



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

**RIKU MÄENPÄÄ**

**SUUNNITTELUFUNKTIOKIRJASTON MÄÄRITTELY**

Diplomityö

Tarkastaja: professori Karri Palovuori  
Tarkastaja ja aihe hyväksytty  
Tieto- ja sähkötekniikan tiedekunta-  
neuvoston kokouksessa 3. kesä-  
kuuta 2009

# TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Sähkötekniikan koulutusohjelma

**MÄENPÄÄ, RIKU:** Suunnittelufunktiokirjaston määrittely

Diplomityö, 46 sivua, 5 liitesivua

Kesäkuu 2010

Pääaine: Elektroniikan laitesuunnittelu

Tarkastaja: professori Karri Palovuori

Avainsanat: avaruus, elektroniikka, suunnittelu, komponentti, kirjasto

Avaruuselektroniikan suunnittelussa pyritään hyödyntämään aikaisemmin toteutettujen laitteiden suunnittelua. Aikaisemmassa suunnittelussa saattaa olla toiminnallisia lohkoja eli funktioita, jotka ovat muokattavissa uuden sovelluksen vaatimuksia vastaaviksi. Tässä työssä määritellään, mitä ja miten jäsenneltyä tietoa suunnittelusta kannattaa tallentaa. Määrittely perustuu kirjaston käyttötarkoitukseen, laatuvaatimuksiin, käytössä oleviin komponentteihin ja avaruuselektroniikan suunnitteluprosessiin.

Toimilohkoista koetaan kirjasto, jota suunnittelussa voidaan hyödyntää. Kirjasto on osa yksikön kehitysprojektia, jonka tavoitteena on kannattavuuden ja kilpailukyvyyn parantaminen. Suunnittelija pystyy hyödyntämään myös muiden aikaisempia kokemuksia. Lisäksi kirjasto hyödyttää laskennassa, jota yksikkö tekee osallistuessaan tarjouskilpailuihin.

Avaruudessa elektroniikka altistuu haastaville ympäristöolosuhteille. Laitteiden tulee olla erityisen luotettavia, mihin pyritään ankarilla laatuvaatimuksilla. Vaatimukset kohdistuvat suunnitteluun, valmistukseen ja käytettäviin materiaaleihin. Työssä esitellään etenkin elektroniikkakomponentteihin kohdistuvia vaatimuksia, sillä komponentit ovat merkittävässä osassa kustannuksia ja aikataulua määriteltäessä. Lisäksi työssä esitellään komponenttien erityispiirteitä verrattuna teollisuuselektroniikassa käytettyihin komponentteihin.

Suurten kappalehintojen lisäksi komponenttien saatavuus on rajoitettua. Tämä johtuu osaltaan pienistä tuotantosarjoista, koska komponenttiyksilöille tehdään kattava testaus. Saatavuuden rajoitukset ovat osaksi myös poliittisia. Työssä esitellään teollisuuden painottumista yhdysvaltoihin ja komponentteihin vaikuttavia vientirajoituksia.

Suunnittelu- ja valmistusprosessit ovat laatuvaatimusten määrittelemiä. Työssä esitellään suunnittelun erityispiirteitä, kuten analyysit ja laitteesta eri tarkoituksia varten valmistettavat mallit. Myös valmistuksen erityispiirteitä ja laitteelle tehtäviä testejä kuvataan.

Näiden tietojen perusteella valitaan olennaiset asiat, jotka toimilohkosta tallennetaan kirjastoon, ja valinnat perustellaan. Lisäksi työssä esitetään kirjaston rakenne yrityksen järjestelmissä ja tietojen keruu niistä. Lopuksi kuvataan, miten kirjaston käyttö liitetään osaksi suunnitteluprosessia.

## ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Electrical Engineering

**MÄENPÄÄ, RIKU:** Specification of a Library for Electronic Design Functions

Master of Science Thesis, 46 pages, 5 Appendix pages

June 2010

Major: Electronics Engineering

Examiner: Professor Karri Palovuori

Keywords: space, electronics, design, component, library

The previous design may contain functional blocks that can be modified to fulfill the requirements for the current design. This thesis specifies a library for these design functions, what integral information should be stored and how it should be presented. The specification is based on the intended utilization of the library, the quality assurance requirements, available electronic components and the design process for electronics in space applications.

Space unit is a part of Systems Business Unit of Patria. The library has been specified as a part of a development process, which aims at improving the profitability and competitiveness of the unit. The library will be utilized during design work, but also during tender calculation.

Space is a challenging environment for systems. There are stringent requirements that try to ensure high reliability. These requirements cover the design and manufacturing work and available materials. Electrical, electronic and electro-mechanical components represent a significant factor in expense calculations and schedule planning. The thesis introduces standard and requirement systems relating to European space projects and space qualified components. Also features particular to space components are presented.

The components have high unit prices compared to industrial electronics, but their availability is also restricted. The reasons for restrictions are partly political. Most of the industry is in the United States and high reliability components are under their export restrictions. Two of these restrictions are introduced in the thesis.

The design process for space systems and some parts particular to it are presented as well. These include analyses, various models that precede the flight model and environmental tests. Also the requirements for manufacturing and handling are presented.

Information integral to the library consists of aforementioned things. The thesis justifies the choices and presents how the library will be integrated into the information systems and design processes of the company.

## ALKUSANAT

Siirryin Patria Aviation Oy:n Space-yksikköön vuoden 2008 alussa. Sitä ennen olin työskennellyt vuosia vedenalaisten valvontajärjestelmien elektroniikkasuunnittelun parissa. Kohtasin avaruuselektroniikan parissa aivan uusia käsitteitä, standardeja ja toimintatapoja. Tämän diplomityön ja muiden työtehtävien myötä koen ymmärtäneeni merkityksen isolle osalle niistä.

Työn tekeminen vaati eri tehtävissä toimivien ihmisten haastattelua ja kommentteja. Kiitän työn ohjaajaa DI Juha Kuitusta ja muita yksikön asiantuntijoita sekä työn tarkastajaa professori Karri Palovuorta kärsivällisestä opastamisesta. Lisäksi haluan kiittää pitkäaikaista mentoriani DI Petri Portinia yhteisistä onnistumisista. Toivon, että työn lukuja kolme ja neljä joku nuorempi suunnittelija joskus lukee johdatuksena avaruuselektroniikan komponentteihin.

Erityisesti haluan kiittää suvun naisia lempeydestä ja pitkämielisyydestä vuonna 1994 alkaneen opiskelutaipaleeni aikana. Varsinkin vastavalmistunut siskoni DI Pia Mäenpää on toiminut kuluneen vuoden aikana hyvänä vertaistukena ja kirittäjänä.

Tampere, 2.6.2010

Riku Mäenpää

# SISÄLLYS

Tiivistelmä .....	II
Abstract .....	III
Alkusanat .....	IV
Lyhenteet, merkinnät ja termit .....	VII
1. Johdanto .....	1
2. Lähtökohdat .....	2
2.1. Kirjaston lähtötiedot .....	2
2.2. Kirjaston määrittelyn tavoitteet .....	2
3. Avaruuselektroniikan vaatimusmäärittelyt .....	4
3.1. Standardit ja vaatimusmäärittelyt .....	4
3.1.1. ECSS-standardit .....	4
3.1.2. Eurooppalaiset komponenttistandardit ja -määrittelyt .....	5
3.1.3. Yhdysvaltalaiset komponenttistandardit .....	7
3.1.4. Laatu luokat ja seulonta .....	8
3.1.5. Komponenttien ja valmistajien kelpuutukset .....	9
3.2. Tuotevarmistus .....	11
3.2.1. Tuotevarmistus ja laadunvarmistus käsitteinä .....	11
3.2.2. Konfiguraatio ja poikkeamat .....	11
3.2.3. Varoitukset .....	13
4. Avaruuselektroniikan suunnittelun erityispiirteitä .....	14
4.1. Suunnitteluprosessi .....	14
4.1.1. Tarjouslaskenta .....	14
4.1.2. Suunnittelun vaiheet ja katselmoinnit .....	16
4.1.3. Mallifilosofia .....	17
4.1.4. Tekniset budjetit ja listat .....	19
4.1.5. Analyysimenetelmät .....	19
4.2. Komponenttien erityispiirteitä .....	21
4.2.1. Avaruusympäristön aiheuttamia vaatimuksia .....	21
4.2.2. Säteily ja sen sieto .....	22
4.2.3. Kotelotyypit .....	24
4.3. Komponenttien saatavuus .....	25
4.3.1. Merkittävät valmistajat .....	25
4.3.2. Yhdysvaltojen vientirajoitukset .....	26
4.3.3. Toimitusajat ja hinnat .....	27
4.3.4. Suositeltavien osien listat .....	27
4.3.5. Kelpoisuusaika .....	28
4.4. Valmistus ja testaus .....	29
4.4.1. Vaaditut hyväksynnät ja sertifikaatit .....	29
4.4.2. Tarkastukset ja jäljitettävyys .....	30

4.4.3.	Käsittely .....	30
4.4.4.	Virittäminen ja testaus .....	31
4.4.5.	Ympäristötestit .....	31
5.	Kirjaston määrittely.....	33
5.1.	Lähtötilanne .....	33
5.1.1.	Aikaisempi suunnittelu .....	33
5.1.2.	Käyttäjät ja tietotekniikkaympäristö .....	34
5.2.	Ominaisuuksia ja toteutusvaihtoehtoja .....	35
5.2.1.	Tuotettavat dokumentit .....	35
5.2.2.	Toteutusvaihtoehdot .....	35
5.3.	Kirjaston rakenne PDM-järjestelmässä.....	36
5.4.	Kirjaston käyttö.....	38
5.4.1.	Työntekijöiden roolit.....	38
5.4.2.	Yhdistäminen suunnittelun vaiheisiin .....	39
5.5.	Tallennettavat tiedot.....	40
5.5.1.	Kytkeäsuunnittelu ja kriittiset suunnitteluparametrit.....	40
5.5.2.	Komponentit.....	41
5.5.3.	Analyysit ja simulaatiot .....	41
5.5.4.	Piirilevysuunnittelu, asennus ja testaus.....	42
5.5.5.	Tietojen keruu .....	42
5.6.	Ylläpito ja konfiguraation hallinta .....	43
5.6.1.	Ohjeistus ja koulutus .....	43
5.6.2.	Variantti vai uusi funktio .....	43
5.6.3.	Tulevaisuus .....	44
6.	Yhteenveto ja jatkokehitys.....	45
	Lähteet.....	47
	Liite 1: ESA:n varoitusjärjestelmä .....	52
	Liite 2: Mission elinkaari .....	53
	Liite 3: Hinta- ja toimitusaikavertailu .....	54
	Liite 4: Datalehden sisältö.....	55
	Liite 5: Datalehden luontiprosessi.....	56

## LYHENTEET, MERKINNÄT JA TERMIT

Lyhenne	Merkitys
<b>AR</b>	Acceptance Review, hyväksyntäkatselmointi
<b>CCN</b>	Contract Change Notice, toimittajan vastaus asiakkaan tekemään muutospyyntöön
<b>CDR</b>	Critical Design Review, yksityiskohtaisen suunnittelun katselmointi
<b>CEN</b>	Comité Européen de Normalisation, Euroopan standardisointijärjestö
<b>CLCC</b>	Ceramic Leaded Chip Carrier, kotelotyyppi (kuvassa 2)
<b>CMOS</b>	Complementary Metal Oxide Semiconductor, mikropiiritekniikka
<b>CNES</b>	Centre National d'Études Spatiales, Ranskan avaruusjärjestö
<b>CR</b>	Change Request, asiakkaan pyyntö toimittajalle sovittujen vaatimusten muuttamisesta
<b>CRR</b>	Commissioning Result Review, kiertoradalla suoritettujen toiminnallisten testien tulosten katselmointi (kuvassa 1)
<b>DESC</b>	Defense Electronics Supply Center, Yhdysvaltain asevoimien logistiikkahallinnon osa, joka siirrettiin osaksi DSCC:tä vuonna 1993
<b>DCL</b>	Declared Components List, lista käytetyistä komponenteista
<b>DIP</b>	Dual In-line Package, kotelotyyppi
<b>DLR</b>	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Saksan avaruusjärjestö
<b>DML</b>	Declared Materials List, lista valmistuksessa käytetyistä materiaaleista
<b>DMPL</b>	Declared Mechanical Parts List, lista valmistuksessa käytetyistä mekaanisista osista
<b>DPL</b>	Declared Processes List, lista valmistusprosesseista
<b>DSCC</b>	Defense Supply Center, Columbus, Yhdysvaltain asevoimien logistiikkahallinnon osa
<b>DRB</b>	Delivery Review Board, toimituskatselmointi
<b>EAR</b>	Export Administration Regulation, yhdysvaltalainen vientirajoitus
<b>EAS</b>	ESA Alert System, ESAn järjestelmä, jolla raportoidaan ongelmista ja virhetoiminnoista
<b>ECI</b>	European Component Initiative, ESAn projekti eurooppalaisen avaruuskomponenttien tuotannon kehittämiseksi
<b>ECSS</b>	European Cooperation for Space Standardization, eurooppalaisen avaruustekniikan standardisointijärjestö
<b>EEE</b>	Electrical, Electronic and Electromechanical, yhteisnimitys sähkötekniikalle, elektroniikka- ja sähkömekaanisille (komponenteille)
<b>EFR</b>	Exponential Failure Rate, eksponentiaalinen vikataajuus [17]:ssä Established Failure Rate, tunnettu vikataajuus

<b>Lyhenne</b>	<b>Merkitys</b>
<b>EGSE</b>	Electrical Ground Support Equipment, sähköinen maatuukilaitteisto
<b>ELDRS</b>	Enhanced Low Dose Rate Sensitivity, bipolaaritransistoreille ominainen alttius heikkotasaisen säteilyn aiheuttamalle vikaantumiselle
<b>EM</b>	Engineering Model, elektroniikkakortin tai -yksikön tekninen malli
<b>EMC</b>	Electromagnetic Compatibility, sähkömagneettinen yhteensopivuus
<b>EPPL</b>	European Preferred Parts List, ESAn suosittelmien osien lista
<b>EQM</b>	Engineering Qualification Model, elektroniikkakortin tai -yksikön tekninen kelpuutusmalli
<b>ERP</b>	Enterprise Resource Planning, toiminnanohjaus(järjestelmä)
<b>ESA</b>	European Space Agency, Euroopan avaruusjärjestö
<b>ESA-PSS</b>	ESA Procedures Standards and Specifications, ECSS:ää edeltänyt standardijärjestelmä
<b>ESA/SCC</b>	ESA Space Components Coordination, ESCC:tä edeltänyt toimielin
<b>ESCC</b>	European Space Components Coordination, eurooppalainen EEE-avaruuskomponenttien vaatimuksia määrittävä yhteisö
<b>ESD</b>	Electrostatic Discharge, staattisen sähköön purkaus
<b>FM</b>	Flight Model, elektroniikkakortin tai -yksikön lentomalli
<b>FMEA, FMECA</b>	Failure Modes and Effects Analysis Failure Modes, Effects and Criticality Analysis, vika- ja vaikutusanalyysi
<b>FP</b>	Flat pack, kotelotyyppi (kuviissa 3 ja 4)
<b>FPGA</b>	Field Programmable Gate Array, ohjelmoitavien logiikkapiirien tyyppi
<b>FS</b>	Flight Spare, elektroniikkakortin tai -yksikön varalentomalli
<b>FSC</b>	Federal Supply Class, Yhdysvaltain puolustusministeriön luokittelujärjestelmä tuotteille
<b>GSFC-QPLD</b>	Goddard Space Flight Center Qualified Parts List Directory, NASAn lista sellaisista avaruuskäyttöön kelpuutetuista osista, joille ei ole soveltuvaa MIL-standardia
<b>ITAR</b>	International Traffic in Arms Regulation, yhdysvaltalainen vientirajoitus
<b>JAN</b>	Joint-Army-Navy, yhdysvaltalainen puolustushaaroille yhteinen standardi
<b>JAXA</b>	Japanese Aerospace Exploration Agency, Japanin avaruusjärjestö
<b>LCCC</b>	Leadless Ceramic Chip Carrier, kotelotyyppi (kuvassa 2)
<b>LETth</b>	Linear Energy Transfer threshold, energiansiirtokyvyn kynnysarvo
<b>LLI</b>	Long-Lead Item, pitkän toimitusajan komponentti



<b>Lyhenne</b>	<b>Merkitys</b>
<b>MDR</b>	Mission Definition Review, mission määrittelykatselmointi (kuvassa 1)
<b>MIP</b>	Mandatory Inspection Point, työn laadun ja valmistusdokumentaation tarkastus, johon osallistuu myös asiakkaan edustaja
<b>MIXS/SIXS</b>	Mercury Imaging X-ray Spectrometer/ Solar Intensity X-ray Spectrometer, röntgensäteilyä mittaava instrumentti
<b>MOSFET</b>	Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor, kytkinkomponenttityyppi
<b>MRR</b>	Manufacturing Readiness Review, valmistusvalmiuskatselmointi
<b>NASA</b>	National Aeronautics and Space Administration, Yhdysvaltain ilmailu- ja avaruushallinto
<b>NCR</b>	Non-conformance Report, poikkeamaraportti
<b>NPSL</b>	NASA Parts Selection List, NASAn suosittelemien osien lista
<b>PA/QA</b>	Product Assurance/Quality Assurance, tuotevarmistus ja laadunvarmistus
<b>PAD</b>	Part Approval Document, dokumentti, jolla komponenttimalli hyväksytetään asiakkaalla käytettäväksi järjestelmässä
<b>PDM</b>	Product Data Management, tuotetiedon hallinta(järjestelmä)
<b>PDR</b>	Preliminary Design Review, alustavan suunnittelun katselmointi
<b>PFM</b>	Protoflight Model, elektroniikkakortin tai -yksikön protolentomalli eli malli, jolle tehdään kelpuutustestaus, mutta joka myös asennetaan avaruusjärjestelmään
<b>PPL</b>	Preferred Parts List, suositeltavien osien lista
<b>PRR</b>	Preliminary Requirements Review, alustava vaatimusten katselmointi (kuvassa 1)
<b>PSA</b>	Parts Stress Analysis, rasitusanalyysi
<b>QFP</b>	Quad Flat Pack, kotelotyyppi
<b>QM</b>	Qualification Model, elektroniikkakortin tai -yksikön kelpuutusmalli
<b>QML</b>	Qualified Manufacturers List, kelpuutettujen valmistajien lista
<b>QPL</b>	Qualified Parts List tai Qualified Products List, kelpuutettujen osien lista
<b>RFD</b>	Request For Deviation, pyyntö vapautua vaatimuksesta, josta tiedetään, ettei se tule täyttymään
<b>RFW</b>	Request For Waiver, pyyntö vapautua vaatimuksesta, jonka täyttymättömyys ilmenee yllättäen
<b>RHA</b>	Radiation Hardness Assurance, säteilyn sietoa kuvaava (luokitus)
<b>RID</b>	Review Item Discrepancy, katselmoinnissa esiin tuotu poikkeama tai epä johdonmukaisuus

Lyhenne	Merkitys
<b>SEE</b>	Single Event Effect, varautuneen hiukkasen aiheuttama tapahtuma tai häiriö
<b>SMD</b>	Standard Microcircuit Drawing, yhdysvaltalainen määrämuotoinen datalehti komponentista Surface Mount Device, kotelotyyppi (kuvassa 2)
<b>SOIC</b>	Small Outline Integrated Circuit, kotelotyyppi
<b>SRR</b>	System Requirements Review, PRR:n jälkeen päivitettyjen vaatimusten katselmointi (kuvassa 1)
<b>STM</b>	Structural and Thermal Model, elektroniikkakortin tai -yksikön rakenne- ja lämpömalli
<b>TID</b>	Total Ionizing Dose, ionisoivan säteilyn kokonaisannos
<b>TO</b>	Transistor Outline, kotelotyyppi
<b>TRB</b>	Test Review Board, testitulosten katselmointi
<b>TRR</b>	Test Readiness Review, testausvalmiuskatselmointi
<b>WCA,</b> <b>WCCPA</b>	Worst Case Analysis Worst Case Circuit Performance Analysis, suorituskykyanalyysi
<b>WFR</b>	Weibull Failure Rate, Weibull-jakauman mukainen vikataajuus

Merkintä	Merkitys
<b>mil (monikko mils)</b>	tuuman tuhannesosa eli 0,0254 mm

Suurin osa lähdemateriaalista on englanninkielistä. Tämä heijastuu myös käytännön työelämän puhekieleen, jossa monille termeille ei ole vakiintunutta suomenkielistä vastinetta. Alla on esitetty tässä työssä käytettyjen termien ja lähdemateriaalien, erityisesti [32]:n, termien vastaavuus.

Termi	Lähdemateriaali	Merkitys
(avaruus)järjestelmä	system	ympäristöstään ja muista järjestelmistä erillinen kokonaisuus [32 s. 40], tässä satelliitti, luotain tai vastaava lentolaite
kaasunpoisto	outgassing	lämpö-alipainekäsittelyllä aikaansaatu kaasunpoistuma
kaasunpoistuma	outgassing offgassing	alhaisessa paineessa tapahtuva molekyyliden irtoaminen aineesta [43 s. 9] molekyyliden irtoaminen aineesta ilmakehään [56 s. 12] eli höyrystyminen
kelpoisuusajan pidennys	relifing	testaus, jolla todennetaan, että säilytys ei vaikuttanut komponentin luotettavuuteen [56 s. 11]

Termi	Lähdemateriaali	Merkitys
kelpuutus	qualification	vaatimustenmukaisuuden osoitus [32 s. 34]
konfiguraation vertailukohta	configuration baseline	voimassa olevat tuotteen vaatimukset, suunnittelun kuvaus ja toteutuksen kuvaus [32 s. 17]
lentokelpoinen	space qualified	avaruusjärjestelmässä käytettäväksi kelpuutettu [17 s. 13, 67–70]
liitinsuoja	saver	avaruusjärjestelmän ja esimerkiksi testi-laitteiston väliin kytkettävä kaksi-suuntainen adapteri, joka vähentää itse järjestelmän liittämiin kohdistuvien kytkentöjen ja irrotusten määrää
missio	mission	avaruusjärjestelmän tehtävä [32 s. 29]
rasitusvaran jättäminen	derating	laitteen suunnitteleminen toimimaan merkittävästi komponenttien toimintarajoja alhaisemmalla tasolla [32 s. 21]
poikkeamaraportti	non-conformance report (NCR)	ilmoitus täyttymättömästä vaatimuksesta, joka käsitellään poikkeamanhallintamenettelyllä [36 s. 11]
seulonta	screening	komponenttien, jotka eivät pysty suorituskyykyvaatimuksiin, etsiminen tuotantoerästä [17 s. 13]
sopimuksenmukainen lähtökohta	contractual baseline	asiakkaan ja toimittajan sopimat vaatimukset tuotteelle
varoitusta	alert	ilmoitus virhetoiminnasta tai poikkeamasta, jonka aiheuttaja saattaisi vaikuttaa useisiin tuotteisiin [32 s. 12]
virittäminen	selection on test	kytkennän komponenttien yksilökohtaisten erojen aiheuttaman virheen mitätöinti virityskomponenttien avulla

Työssä käytetään termejä ”tyyppi” ja ”malli” seuraavien esimerkkien tapaan:

komponenttityyppi, kotelotyyppi

MOSFET, DIP

komponenttimalli, kotelomalli

2N7545U3, DIP-28

# 1. JOHDANTO

Avaruusjärjestelmiin tarkoitettujen elektroniikan suunnittelu eroaa monin tavoin kuluttaja- tai teollisuuselektroniikan suunnittelusta. Suunnittelukustannukset yksittäistä elektroniikkakorttia kohden ovat mittavat, sillä sarjatuotanto on erittäin harvinaista, ja silloinkin kyse on muutamista, enintään kymmenistä kappaleista. Kiinteitä kustannuksia lisää suunnittelua ohjaavien standardien vaatima dokumentointi.

Suunnittelijan käytettävissä olevien elektroniikkakomponenttien valikoima on erittäin rajoitettu ja uudistuu hitaasti. Tämä johtaa siihen, että tietyt toiminnot toteutetaan yleensä samankaltaisilla ratkaisuilla. Suora kopiointi ei välttämättä kuitenkaan ole mahdollista erilaisten toimintaympäristöjen tai muiden vaatimusten takia. Tässä työssä määritellään suunnittelufunktiokirjasto, johon tallennetaan käytettyjä ratkaisuja myöhemmin hyödynnettäväksi. Funktio on toiminnallinen lohko eli kytkentä, joka toteuttaa tietyn toiminnon.

Yksikössä, johon työ on tehty, erityispiirteitä on aikaisemmin tehdyissä opinnäytteissä kuvattu mm. luotettavuuden [1], analyysimenetelmien [2] ja testauksen [3] näkökulmasta. Tässä työssä tarkastellaan erityisesti avaruusjärjestelmissä käytettyjä elektroniikkakomponentteja. Tavoitteena on, että työ antaisi näistä perustiedot avaruussovelusten pariin siirtyvälle elektroniikkasuunnittelijalle.

Luvussa kaksi esitellään työn lähtökohdat ja tavoitteet. Kirjastoa ei ole tarkoitettu vain elektroniikkasuunnitteluun, vaan sitä tullaan hyödyntämään myös tarjouslaskennassa. Kirjastoon tallennetaan käytettyjä ratkaisuja siten, että soveliaiden funktioiden vertailu on mahdollista.

Luvussa kolme esitellään avaruuselektroniikan suunnitteluun ja komponentteihin liittyviä standardeja ja vaatimusmäärittelyjä. Eurooppalaisten ja yhdysvaltalaisen komponenttistandardien osa-alueet sekä laatuluokan käsite esitellään. Samoin esitellään tuotteen yksiselitteisesti määrittävä konfiguraatio ja sen hallintaan liittyviä asioita.

Luvussa neljä esitellään avaruuselektroniikan suunnittelun erityispiirteitä. Erityispiirteet määrittelevät pitkälti sen, mitä tietoja funktioista kannattaa kirjastoon tallentaa. Lisäksi esitellään komponenttien erityispiirteitä.

Luvussa viisi kuvataan kirjaston rakenne ja perustellaan, mitä kirjastoon kustakin funktiosta tallennetaan. Lisäksi määritellään kirjaston vastuuhenkilöiden tehtävät ja esitellään prosessi funktioiden lisäämiseksi kirjastoon.

Luvussa kuusi esitetään yhteenveto työstä ja työn tekemisen aikana ilmenneitä kehitysehdotuksia. Kehitysehdotukset liittyvät kirjaston kasvamiseen merkittävästi määritettyä suuremmaksi materiaaliltaan tai käyttäjäkunnan laajentumiseen

## **2. LÄHTÖKOHDAT**

Patria-konsernin Patria Aviation Oy -tytäryhtiössä ja sitä edeltäneissä yhtiöissä on suunniteltu elektroniikkaa avaruusjärjestelmiin vuodesta 1988 lähtien [1]. Satelliitteihin asennettavien elektroniikkakorttien ja niistä koostuvien elektroniikkayksiköiden lisäksi yhtiössä on suunniteltu testausta ja huoltoa varten sähköisiä maatuksilaitteistoja (EGSE, engl. Electrical Ground Support Equipment). Suunnittelu on lähes kokonaan tehty Tampereen toimipisteessä, Systems-liiketoiminnan Space-yksikössä.

Yksikössä on suunniteltu kymmeniä elektroniikkakortteja, joissa on ollut yhteensä satoja funktioita. Käyttökelpoisimmista funktioista tullaan kokoamaan kirjasto, jotta aikaisempaa suunnittelua pystytään hyödyntämään nykyistä paremmin. Suunnittelu-funktiokirjaston määrittely on osa yksikön kehitysprojektia. Kehitysprojektin tavoitteet ovat kannattavuuden ja toimitusvarmuuden parantamisen sekä kilpailukyvyyn lisääminen.

### **2.1. Kirjaston lähtötiedot**

Space-yksikön suunnittelemista elektroniikkakorteista ja -yksiköistä on koottu listaus kirjaston luontia varten. Listauksessa eritellään kussakin projektissa toteutetut funktiot ja niiden lukumäärät. Listauksen jaottelu toimii pohjana kirjaston funktiotyyppien jaottelulle.

Kirjaston määrittelyvaiheessa valitaan pilottifunktiot eli ensimmäiset funktiot, jotka kirjastoon tallennetaan. Pilottifunktioiksi valitaan funktioita, joita oletetaan hyödynnettävän tulevaisuudessa tarjouksissa tai suunnitteluprojekteissa. Näin kirjaston toimivuudesta saadaan käytännön kokemusta mahdollisimman nopeasti ja mahdolliset muutokset tarvitsee toteuttaa vain pieneen määrään funktioita.

### **2.2. Kirjaston määrittelyn tavoitteet**

Kirjaston käyttöönotto laskee kertaluonteisia kustannuksia vähentämällä suunnitteluun ja analyysiin tarvittavaa työmäärää Samojen tai samantyylisten virheiden toistuminen estyy, vaikka aikaisemman vastaavan suunnittelun tehneet henkilöt eivät enää olisi käytettävissä.

Kirjaston käyttöönotto parantaa myös toimitusvarmuutta. Työmääräarviot helpottavat aikataulutusta, ja mahdollisiin huonosti saataviin tai pitkän toimitusajan komponentteihin (LLI, engl. Long-Lead Item) osataan varautua riittävän aikaisin.

Lisäksi kirjaston käyttöönotto helpottaa tarjouslaskentaa ja pienentää kustannusepävarmuuksiin liittyviä riskejä. Tarjouksen laatimiseen on käytettävissä rajattu aika, ja

tarjous saattaa sisältää sangen yksityiskohtaista tietoa. Useissa tarjouspyynnöissä asiakas määrittelee tarkasti, mitä aineistoa tarjouksen tulee sisältää ja miten se on jäseneltävä. Kirjaston avulla voidaan tarjousta laadittaessa tehtävään esisuunnitteluun valita sopivat funktiot. Valitut funktiot antavat pohjan tehonkulutus- ja massalaskelmille sekä kustannusarviolle.

Määrittelyvaihe tuottaa ohjeistuksen kirjaston käyttöä ja ylläpitoa varten. Ohjeistuksen ja ylläpitäjän avulla funktion suunnittelija pystyy tuottamaan funktiosta datalehden eli kirjastokuvauksen. Ohjeistuksen avulla kirjaston ylläpitäjä pystyy tallentamaan projektin tuottaman datalehden ja varsinaisen materiaalin kirjastoon. Lisäksi ylläpitäjä pystyy huolehtimaan kirjaston materiaalin yhtenäisyydestä.

### 3. AVARUUSELEKTRONIIKAN VAATIMUSMÄÄRITTELYT

Avaruusjärjestelmällä, esimerkiksi satelliitilla, on missio eli jokin tarkoitus. Suunnittelu, valmistus ja näiden rinnalla suoritettavat tuotevarmistus sekä laadunvarmistus tähtäävät tämän mission täyttämiseen. Esimerkiksi BepiColombo-missio kerää tieteellistä informaatiota Merkuriuksesta. Missio on hyväksytty Euroopan avaruusjärjestössä (ESA, engl. European Space Agency) vuonna 2000. Oletettu laukaisu on vuonna 2014 ja satelliitti on Merkuriuksen kiertoradalla vuonna 2020 [4; 5]. Vuoden 2009 lopussa oletettiin, että mission kokonaiskustannukset tulevat nousemaan 970 miljoonaan euroon [6].

Kaikki missiot eivät ole kestoiltaan tai kustannuksiltaan näin mittavia, mutta tämän suuruusluokan hankkeiden täytyy olla erityisen luotettavia. Luotettavuuteen pyritään yksityiskohtien hallinnalla. Avaruusjärjestelmien suunnittelun ja valmistuksen yksityiskohtia ohjaavat lukuisat standardit ja vaatimusmäärittelyt.

#### 3.1. Standardit ja vaatimusmäärittelyt

Avaruuselektroniikan suunnittelulle ja valmistukselle on leimallista suuri dokumentaation määrä. Suunnittelua ohjaavat asiakkaan määrittelyt, mission määrittelyt ja vallitsevat standardit. Näiden vaatimusten noudattaminen osoitetaan projektin aikana tuotetulla dokumentaatiolla.

Standardit kattavat koko tuotteen elinkaaren. Kirjaston kannalta merkittävät standardit käsittelevät suunnittelun lisäksi valmistusta ja käytettävissä olevia EEE-komponentteja eli sähkötekniillisiä, elektronisia ja sähkömekaanisia komponentteja (engl. Electrical, Electronic and Electromechanical). Standardit ohjaavat komponenttien valintaa, hankintaa ja käyttöä. Komponentteja koskevat standardit ovat osaksi yhdysvaltalaisia. Tämä johtuu teollisuuden painottumisesta, jota on kuvattu alaluvussa 4.3.

##### 3.1.1. ECSS-standardit

Eurooppalaisen avaruusteollisuuden laadunvarmistusstandardeja kehittää koordinoituyhteisö ECSS (engl. European Cooperation for Space Standardization). Se aloitti toimintansa vuonna 1993. ECSS:n jäseniä ovat ESA, osa Euroopan kansallisista avaruusjärjestöistä ja teollisuutta edustava Eurospace-järjestö. Eurospacen jäsenyritysten liikevaihto kattaa yli 90 % eurooppalaisen avaruusteollisuuden liikevaihdosta. [7.] Myös Patria Aviation on sen jäsen.

ECSS-standardit jakautuvat neljälle pääalueelle ja näiden alialueille taulukon 1 mukaisesti. Osa ECSS-standardeista on hyväksytty yleiseurooppalaisiksi EN-standar-

deiksi Euroopan standardisointijärjestö CEN:n (ransk. Comité Européen de Normalisation) kautta. Komponentteihin liittyvät standardit ovat julkisesti saatavilla [8].

*Taulukko 1. ECSS:n standardien osa-alueet.*

ECSS-S-ST-standardit		
00 Järjestelmän kuvaus		
Projektin hallinta	Tuotevarmistus	Suunnittelu
ECSS-M-ST-standardit	ECSS-Q-ST-standardit	ECSS-E-ST-standardit
10 projektisuunnittelu	10 tuotevarmistuksen	10 järjestelmäsuunnittelu
40 konfiguraation ja tiedon-	hallinta	20 sähkö- ja optiikka-
hallinta	20 laadunvarmistus	suunnittelu
60 kustannusten ja aika-	30 luotettavuus	30 mekaniikkasuunnittelu
taulun hallinta	40 turvallisuus	40 ohjelmistosuunnittelu
70 logistiikka	60 EEE-komponentit	50 tiedonsiirto
80 riskien hallinta	70 materiaalit, mekaa-	60 ohjaussuunnittelu
	niset osat ja prosessit	70 maajärjestelmät
	80 ohjelmistojen tuote-	
	varmistus	

Voimassa olevat standardit on kuvattu [9]:ssä. Esimerkiksi ECSS-Q-ST-10-alialueella olivat helmikuussa 2010 voimassa alla olevat standardit. Viimeinen kirjain ilmaisee standardin version:

- ECSS-Q-ST-10C Product assurance management
- ECSS-Q-ST-10-04C Critical-item control
- ECSS-Q-ST-10-09C Nonconformance control system

ECSS-standardit korvaavat aikaisemmat ESA-PSS-standardit (engl. ESA Procedures Standards and Specifications). Kaikille niistä ei ole vielä julkaistu korvaajaa, joten teknisessä dokumentaatiossa saatetaan viitata aikaisemman järjestelmän standardeihin.

ECSS on tuottamassa myös ohjeistusta, joka ei sisällä vaatimuksia. Helmikuuhun 2010 mennessä vain yksi dokumentti oli edennyt julkaisuun asti. Ohjeistus jakaantuu osa-alueille vastaavasti kuin standardit.

### 3.1.2. Eurooppalaiset komponenttistandardit ja -määrittelyt

Eurooppalaisia vaatimusmäärittelyjä komponenteille kehittää koordinoituyhteisö ESCC (engl. European Space Components Coordination). Se aloitti toimintansa vuonna 2002. ESCC:n jäseniä ovat ESA, osa Euroopan kansallisista avaruusjärjestöistä, eräät eurooppalaiset komponenttien valmistajat ja Eurospace [10, s. 13]. ESCC:n ohjeet ja määrittelyt jakautuvat viidelle tasolle taulukon 2 mukaisesti.



*Taulukko 2. ESCC:n määrittelyjen tasot ja osa-alueet.*

Taso	ESCC-numero	Osa-alue
0	0xxxx	menettelytavat
1	10xxx 11xxx 12xxx	organisaatio tukitoiminnot toimeenpano
2	2xxxx 2xxxxxxx	yleiset määrittelyt ja tekninen ohjeistus tyyppikohtaiset yleiset määrittelyt
3	xxxx	tyyppikohtaiset määrittelyt
4	xxxx/xxx	yksityiskohtaiset määrittelyt

Voimassa olevat dokumentit on kuvattu [11]:ssä. Ne ovat julkisesti saatavilla [12]. Tasojen 0 ja 1 dokumentit kuvaavat järjestelmän toimintaa. Ne eivät sisällä vaatimuksia. Tasot 2, 3 ja 4 muodostavat varsinaisen ESCC-järjestelmän. Esimerkiksi:

- 20500 [13] määrittelee vaatimukset komponenttien visuaaliselle tarkastukselle.
- 2053400 [14] tarkentaa yllämainittua liittimien osalta.
- 3401 [15] määrittelee vaatimukset pyöreille ja suorakaiteen muotoisille liittimille.
- 3401/002 [16] tarkentaa yllämainittua puristuskontaktisten D-liittimien osalta.

Yksityiskohtaiset vaatimusmäärittelyt sisältävät komponentin yksiselitteisen tunnisteen muodostamisperiaatteet. Tämän avulla komponenttiin voidaan viitata käyttämättä valmistajakohtaisia mallinimiä, mikäli komponentille on useampi kelpuutettu valmistaja. Kelpuutettuja valmistajia on käsitelty alaluvussa 3.1.5.

ESCC-järjestelmä pohjautuu sitä edeltäneisiin ESA/SCC-määrittelyihin (engl. ESA Space Components Coordination). Aikaisempaan järjestelmään saatetaan vielä viitata teknisessä dokumentaatiossa, varsinkin jos dokumentteja ei ole päivitetty vaihdoksen jälkeen.

ESCC tukee ECSS:ää standardin ECSS-Q-ST-60 [17] kehityksessä. Standardi määrittelee vaatimukset komponenttien valinnalle, hankinnalle ja käytölle. Standardi jakaa komponentit kolmeen luokkaan. Vaatimukset ovat kovimmat luokan 1 komponenteille ja lievimmät luokan 3 komponenteille. Luokan 1 komponentit on vastaavasti tarkoitettu kriittisimpiin sovelluksiin, joissa toimintahäiriöiden riski halutaan minimoida.

Standardissa itsessään ei ole dokumentointi-, todentamis- tai testaustapoja, vaan siinä viitataan ESCC-määrittelyihin, toisiin ECSS-standardeihin ja yhdysvaltalaisiin komponenttistandardeihin. Vähimmäisvaatimukset kullekin komponenttityypille kussakin luokassa on ilmaistu laatuluokilla ja mahdollisilla tarkennuksilla tai lisämääreillä. Laatuluokkia on käsitelty alaluvussa 3.1.4.

### 3.1.3. Yhdysvaltalaiset komponenttistandardit

Järjestelmissä käytettäville komponenteille voidaan määritellä vähimmäisvaatimukset myös ilman ECSS-Q-ST-60:n mukaisten luokkien käyttöä. ESCC-järjestelmässä esimerkiksi integroituja piirejä on vähän yhdysvaltalaisiin sotilas- eli MIL-standardeihin verrattuna, joten vaatimustaso ilmaistaan MIL-standardien mukaisesti. Samoin ESCC-järjestelmässä viitataan ESCC-määrittelyjen lisäksi MIL-standardeihin esimerkiksi testaustavoissa.

Yhdysvaltain asevoimien logistiikkahallinnon osa, DSCC (engl. Defense Supply Center, Columbus), vastaa asevoimien varusteiden standardoinnista ja hankinnasta. Myös Yhdysvaltain avaruusjärjestön (NASA, engl. National Aeronautics and Space Administration) vastaavat toiminnot kuuluvat DSCC:n vastuualueeseen. DSCC julkaisee ja ylläpitää standardeja, ohjeistuksia ja eritasoisia vaatimusmäärittelyjä. MIL-standardit ovat julkisesti saatavilla [18]. Taulukossa 3 on esitetty taulukkoa 2 vastaava jaottelu.

*Taulukko 3. Komponentteja koskevien MIL-standardien jaottelu.*

Standardi tai määrittely	Osa-alue
MIL-STD-sarja	laaja-alaiset määrittelyt
MIL-HDBK-sarja	ohjeistus
MIL-PRF-sarja	yleiset määrittelyt
MIL-PRF-xxxxx/xxx	yksityiskohtaiset määrittelyt
SMD-sarja (5962-xxxxx)	integroitujen piirien yksityiskohtaiset määrittelyt

MIL-STD-sarjan standardit ovat laaja-alaisia. Esimerkiksi MIL-STD-883 [19] määrittelee yksityiskohtaisesti mikropiirien testaustapoja. Testaustapoihin viitataan muissa julkaisuissa ja kelpuutuksen saamiseksi valmistajien on testattava piirit niitä noudattaen.

MIL-PRF-sarja sisältää yleisen tason vaatimusmäärittelyjä. Esimerkiksi MIL-PRF-38535 [20] määrittelee kelpuutusvaatimuksia integroitujen piirien valmistajille. Vastaavia määrittelyjä on erillispuolijohdekomponenteille, hybridipiireille ja erityyppisille passiivikomponenteille.

Yksityiskohtaisia vaatimusmäärittelyjä julkaistaan kahdessa sarjassa. Esimerkiksi MIL-PRF-19500/712 [21] määrittelee suorituskyykyvaatimukset 2N7545U3-malliselle MOSFET:lle. Dokumenttitunnuksen muodon takia näistä käytetään virallisestikin nimitystä ”slash sheet”. Passiivikomponenttien yksityiskohtaiset vaatimusmäärittelyt on luokiteltu vastaavasti.

Integroitujen piirien yksityiskohtaiset vaatimusmäärittelyt julkaistaan SMD-sarjassa. SMD:t (engl. Standard Microcircuit Drawing) ovat määrämuotoisia datalehtiä. Esimerkiksi 5962-98651 [22] määrittelee tietynlaisen ajuripiirin suorituskyykyvaatimukset. Näistä käytetään myös nimitystä DESC 5962 -sarja, jolla viitataan SMD:itä edeltäneeseen DESC-sarjaan (engl. Defence Electronics Supply Center) ja mikropiirien FSC-numeroon (engl. Federal Supply Class).

Yksityiskohtaiset vaatimusmäärittelyt sisältävät mekaanisten ja suorituskyykyvaatimusten lisäksi komponentin yksiselitteisen tunnisteen muodostamisperiaatteet. Tunniste määrittelee esimerkiksi integroidun piirin valmistajan, kotelotyypin, säteilyn ja ESD:n (engl. Electrostatic Discharge) siedon sekä laatuluokan.

MIL-HDBK-sarjan dokumentit ovat ohjeistusta eivätkä sisällä vaatimuksia. Esimerkiksi MIL-HDBK-103 [23] sisältää listauksen kaikista SMD:istä ja niiden yksiselitteisistä tunnisteista. Listauksessa on myös kaupallinen mallinimi mainittu ristiviittausten ja hakujen mahdollistamiseksi.

### 3.1.4. Laatuluokat ja seulonta

Laatuluokka kuvaa komponentille asetettuja suorituskyykyvaatimuksia ja valmistajan komponentille tekemää testausta. Kunkin laatuluokan edellytykset esitetään määrittelyissä. Edellytykset vaihtelevat määrittelystä toiseen, samoin vaihtelevat laatuluokkien tunnuksat. Yleisimmät laatuluokat on esitetty taulukossa 4, jossa standardin ECSS-Q-ST-60 määrittelemät lentokelpoiset luokat on lihavoitu [17 s. 13, 67–70].

Seulonta tarkoittaa komponenttierälle tehtyä testausta, jossa etsitään vaatimuksiin kykenemättömiä komponentteja. Laatuluokka määrittelee, mitä testejä tehdään ja kuinka suuri osa erästä joutuu kuhunkin testiin. Laatuluokat myös määrittävät, mikä määrä hylättyjä komponentteja aiheuttaa valmistuserän hylkäämisen.

*Taulukko 4. Yhteenvedo yleisimmistä laatuluokista (lentokelpoiset lihavoitu).*

	ESCC/ECSS	MIL
<b>passiivikomponentit</b>		
määrittely	useita	useita
luokan nimitys	Testing Class	EFR WFR
luokat	<b>B, C</b>	<b>S, R, P, M</b> <b>D, C, B</b>
<b>erillispuolijohdekomponentit</b>		
määrittely	ESCC 5000	MIL-PRF-19500
luokan nimitys	ei ole	JAN quality level
luokat	ei ole	<b>JANS, JANTXV, JANTX, JAN</b>
<b>integroidut piirit</b>		
määrittely	ESCC 9000	MIL-PRF-38535
luokan nimitys	ei ole	Device class
luokat	ei ole	<b>V, Q, M, N</b>
<b>hybridipiirit</b>		
määrittely	ECSS-Q-ST-60-05	MIL-PRF-38534
luokan nimitys	Testing level	Device class
luokat	<b>1, 2</b>	<b>K, H, G, D</b>

ESCC-järjestelmässä laatuluokat määritellään tyyppikohtaisissa määrittelyissä. Laatuluokkien nimitykset ovat Testing Class B ja Testing Class C. Kaikissa määrittelyissä ei ole laatuluokkia. Tällaisia ovat erillispuolijohdekomponenttien 5000 [24] ja integroitujen piirien 9000 [25]. Joissakin määrittelyissä, esimerkiksi 3401:ssä [15], on määriteltä vain yksi luokka.

Jos kaksi luokkaa on määriteltä, Testing Class B on näistä vaativampi. Lisäksi B-luokan komponenteilla on valmistajan antama yksilöllinen sarjanumero, ja valmistajan tulee toimittaa komponenttien mukana yksilölliset testitulokset. Joissakin tapauksissa suorituskykyvaatimukset saattavat olla samat kummassakin luokassa.

Hybridipiireille on standardi ECSS-Q-ST-60-05 [26], jossa laatuluokkien nimitykset ovat Testing level 1 ja Testing level 2. Näistä ensin mainittu on vaativampi. Kuten yllä, Testing level 1 -komponentit ovat sarjanumeroituja ja niiden mukana toimitetaan yksilölliset testitulokset.

Integroitujen piirien MIL-PRF-38535 [20] määrittelee laatuluokat V, Q, M ja N, joista ensin mainittu on vaativin. Näiden lisäksi on määriteltä komponenttityyppikohtainen luokka T. Vaativin laatuluokka on tarkoitettu avaruussovelluksiin, mutta myös toiseksi vaativinta voidaan käyttää vaatimusten salliessa. Luokista käytetään myös ilmaisua QML <luokka>, esimerkiksi QML V. Tällä viitataan siihen, että valmistaja on standardin kelpuutettujen valmistajien listalla. Valmistajien kelpuutuksia on kuvattu alaluvussa 3.1.5.

Hybridipiirien MIL-PRF-38534 [27] määrittelee vastaavasti laatuluokat K, H, G ja D, joista ensin mainittu on vaativin. Näiden lisäksi on määriteltä komponenttityyppikohtainen luokka E. Kuten integroiduilla piireillä, vaativin laatuluokka on tarkoitettu avaruussovelluksiin, mutta myös toiseksi vaativinta voidaan käyttää vaatimusten salliessa.

Erillispuolijohdekomponenttien MIL-PRF-19500 [28] määrittelee laatuluokat JANS, JANTXV, JANTX ja JAN, joista ensin mainittu on vaativin. Näiden lisäksi on määriteltä komponenttimallikohtainen luokka JANJ. Myös näissä on vaativin laatuluokka tarkoitettu avaruussovelluksiin ja toiseksi vaativinta voidaan käyttää vaatimusten salliessa.

Useimpien passiivikomponenttityyppien MIL-PRF-standardit määrittelevät laatuluokkien sijasta vikataajuusluokat. Luokat perustuvat vikaantumisen eksponentiaaliseen jakaumaan (EFR, engl. Exponential Failure Rate) tai Weibull-jakaumaan (WFR, engl. Weibull Failure Rate). EFR-luokkien tunnuksset ovat vaativimmasta alkaen S, R, P ja M. WFR-luokkien tunnuksset ovat vaativimmasta alkaen D, C ja B. Lisäksi saatetaan määritellä komponenttityyppikohtaisesti muita luokkia, joissa saatetaan jopa käyttää edellä mainittuja tunnuksia, joten vikataajuusluokan merkitys on tarkastettava tyyppikohtaisesta standardista.

### **3.1.5. Komponenttien ja valmistajien kelpuutukset**

Avaruusjärjestelmässä käytettävän komponentin pitää pääsääntöisesti olla lentokelpuutettu. ECSS-Q-ST-60 määrittelee tämän siten, että komponentin tulee kuulua ESA:n tai

NASA:n kelpuutettujen osien listalle (QPL, engl. Qualified Parts List). Vaihtoehtoisesti komponentin valmistajan tuotantoprosessin pitää kuulua kelpuutettujen valmistajien listalle (QML, engl. Qualified Manufacturers List). Lisäksi standardi määrittelee komponenttityypeille vähimmäislaatuluokan, ks. taulukko 4.

QPL on konseptina QML:ää vanhempi. QPL:llä olevalle komponentille on määritetty yksityiskohtaisesti valmistuksen vaiheet ja komponenttiyksikölle suoritettava testaus. Integroidut piirit ovat vuosikymmenien kuluessa tulleet aina monimutkaisemmiksi, joten QPL:ään perustuva luokittelu käy näiden osalta raskaaksi. Toisaalta elektroniikan valmistusmenetelmät ja laadunvarmistusmenetelmät ovat samalla kehittyneet.

QML:ään perustuvassa järjestelmässä kelpuutetaan valmistajan tietyn komponentin tuotantoprosessi. Komponentille on asetettu suorituskyykyvaatimukset, mutta valmistajalla on vapaus päättää valmistustapa. Tietyn tuotantoerän komponenteista testataan laatuluokasta riippuen - täydellisesti vain osa. Valmistajan tulee seurata tuotantoprosessiaan ja kelpuuttava taho auditoi sen määräajoin. Läpäistyn auditoinnin jälkeen valmistajan kelpuutusta jatketaan.

ESCC koordinoi kelpuutettujen komponenttien listaa (ESCC QPL) ja kelpuutettujen valmistajien listaa (ESCC QML). ESCC QPL [29] esittää kelpuutetut komponentit tyyppikohtaisesti lajiteltuna ja viittaa ESCC-järjestelmän yksityiskohtaisiin määrittelyihin. ESCC QML [30] esittää valmistajat, näiden eurooppalaiset toimipisteet ja yleisellä tasolla tuotteet, joille kelpuutus on myönnetty. Huomionarvoista on, että helmikuuhun 2010 mennessä oli kelpuutettu vain kaksi eurooppalaista tuotantoprosessia.

NASA:lle pätevät DSCC:n ylläpitämät, MIL-standardeihin perustuvat QPL:t ja QML:t. Sellaisille komponenteille, joille ei suoraan ole suoraan avaruuskäyttöön soveltuvia MIL-standardeja, on NASA:lla oma kelpuutettujen komponenttien lista. Tämä GSFC-QPLD [31] (engl. Goddard Space Flight Center Qualified Parts List Directory) sisältää lähinnä liittimiä ja passiivikomponentteja.

Mikäli halutaan käyttää komponentteja, jotka eivät ole lentokelpuutettuja, nämä on hyväksyttävä erikseen asiakkaalla. Samoin erillinen hyväksyttäminen vaaditaan, mikäli komponenttia käytetään vaativimmissa olosuhteissa kuin mihin se on määritetty [17 s. 23]. Hyväksyttämisdokumentti PAD (engl. Part Approval Document) on määrämuotoinen. PAD:ssä kuvataan komponentin mahdolliset, lentokelpoisuutta vaatimattomammat kelpuutukset. Lisäksi kuvataan komponentille tehdyt lisätestit. Saatu hyväksyntä koskee vain tiettyä komponenttiterää.

Komponentteihin kohdistuvat vaatimukset saattavat olla erilaiset järjestelmän eri osille. Satelliitin runkoon (engl. platform) kuuluvan yksikön luotettavuuteen panostetaan todennäköisesti enemmän kuin hyötykuormaan (engl. payload) kuuluvaan mittalaitteeseen. Laitteesta vastaava taho voi kustannusten säästämiseksi määritellä, että laite toteutetaan alempien laatuluokkien komponenteilla, kunhan järjestelmästä vastaava taho hyväksyy tämän.

### 3.2. Tuotevarmistus

Standardeissa laatu (engl. quality) on määritelty tuotteen, esimerkiksi elektroniikkakortin, ominaisuuksien ja vaatimusten vastaavuudeksi [32, s. 34]. Riittävän laadukkaaseen tuotteeseen pyritään tuotevarmistuksella (PA, engl. Product Assurance). Tuotevarmistuksen päätavoite on mission toteutuminen turvallisesti ja luotettavasti [33, s. 10].

Tuotevarmistus tuottaa omaa dokumentaatiotaan projektin ajan. Varmistussuunnitelman laatimisen jälkeen pidetään kirjaa vaatimuksista ja muutoksista niihin sekä ajantaisista suunnittelu- ja valmistusdokumenteista. Lisäksi kirjaa pidetään katselmoinneissa tai muuten ilmenneistä epäkohdista ja niiden ratkaisuista, jotta luovutusvaiheessa voidaan osoittaa näiden olevan käsitelty.

#### 3.2.1. Tuotevarmistus ja laadunvarmistus käsitteinä

Suomenkielisessä laatukäsitteistössä laadunvarmistus (QA, engl. Quality Assurance) on selkeästi käytetympi termi kuin tuotevarmistus tai -varmennus. ECSS:n standardit määrittelevät QA:n osaksi PA:ta. Laadunvarmistuksella pyritään riittävään varmuuteen siitä, että tuote täyttää vaatimukset. Varmuus saavutetaan määrittelyillä, suunnitelmilla ja näiden noudattamisen valvonnalla.

PA ja QA kattavat tuotteen koko elinkaaren. Tämän kuvaa lista asioista, joille laadunvarmistus [34, s. 11–12] asettaa vaatimuksia:

- tuotevarmistuksen hallinta
- leimat ja allekirjoitukset, jäljitettävyys, mittaustavat ja kalibroinnit, käsittely ja säilytys sekä tilastolliset menetelmät
- suunnittelu ja vaatimustenmukaisuuden todentaminen
- hankinta
- valmistus, kokoonpano ja osajärjestelmien integrointi
- testaus
- hyväksyntä ja toimitukset
- maatukijärjestelmät

Tuotevarmistuksen hallinta on osa suunnitteluprojektia. Hallinnasta laaditaan suunnitelma ja sille määritellään vastuuhenkilöt. Hallinnan vaatimukset on määritelty [33]:ssa. Suunnittelun kannalta merkityksellisimpiä käsitteitä ovat konfiguraatio, poikkeamat ja varoitukset.

#### 3.2.2. Konfiguraatio ja poikkeamat

Konfiguraatio määrittelee tuotteen ominaisuudet yksiselitteisesti. Konfiguraatio jakautuu kolmeen osaan. Seuraavat dokumentit yhdessä muodostavat tietyllä hetkellä voimassa olevan konfiguraation vertailukohdan:

- Asiakkaan ja toimittajan tuotteelle sopimat vaatimukset muodostavat sopimuksenmukaisen lähtökohdan. Vaatimukset esitetään vaatimusdokumenteissa.

Lisäksi toimittaja esittää, miten tulee todentamaan tuotteen vaatimustenmukaisuuden.

- Tuote, sellaisena kuin se on suunniteltu, kuvataan suunnitteludokumenteissa. Näihin viitataan termillä ”as-designed”. Suunnitteludokumentaatio julkaistaan ja hyväksytetään asiakkaalla ennen valmistuksen aloittamista.
- Tuote, sellaisena kuin se on toteutettu, kuvataan valmistusdokumenteissa. Näihin viitataan termillä ”as-built”. Erot as-designed:n ja as-built:n välillä on dokumentoitava ja hyväksyttävä.

Vaatimustenmukaisuuden osoittaminen eritellään vaatimuskohtaisesti. Se voi perustua analyysiin, suorituskky- tai toiminnalliseen testiin, suunnittelun katselmointiin, tuotteen visuaaliseen tarkastukseen tai näiden yhdistelmään. Vaatimusedokumentit ja standardit saattavat määritellä todentamistavan ainakin osalle vaatimuksista. Esimerkiksi kaikki turvallisuuden kannalta kriittiset toiminnot on todennettava testeillä [35 s. 17].

Vaatimukset muuttuvat ja tarkentuvat mission ja järjestelmien kehityksen edetessä. Vastaavasti suunnittelu ja analyysit tuovat esiin uusia seikkoja. Tällöin asiakas ja toimittaja sopivat muutoksista sopimukselliseen lähtökohtaan. Kirjanpito muutoksista ja voimassa olevista vaatimuksista on osa konfiguraation hallintaa.

Asiakas tekee muutosehdotuksen (CR, engl. Change Request), johon toimittaja vastaa. Vastauksessa (CCN, engl. Contract Change Notice) toimittaja esittää muutoksen vaikutukset esimerkiksi kustannuksiin tai aikatauluihin. Mikäli asiakas hyväksyy CCN:n, muutos tulee voimaan ja sopimuksenmukainen lähtökohta päivittyy. Yleensä asiakas julkaisee päivitetyn vaatimusedokumentin. Toimittaja voi myös tehdä CCN:n oma-aloitteisesti. Jos asiakas hyväksyy sen, sopimuksenmukainen lähtökohta muuttuu.

Toimittaja voi pyytää vapautusta tietyistä vaatimuksista. Pyynnössä kuvataan syyt, miksi vaatimusta ei pystytä täyttämään ja perustelut, miksi vapautus tulisi myöntää. RFD (engl. Request For Deviation) tehdään yleensä suunnitteluvaiheessa, kun tiedetään etukäteen, että tuotteessa on poikkeama eli täyttymätön vaatimus. RFW (engl. Request For Waiver) tehdään yleensä valmistus- tai testausvaiheessa, kun poikkeama havaitaan yllättäen. RFW koskee tiettyä yksilöä.

Sopimuksellinen lähtökohta ei muutu, vaikka asiakas myöntäisi vapautuksen. RFD koskee vain tiettyä suunnittelun kohtaa, ja jos vastaavasta kohdasta toisaalla halutaan vapautus, on siitä tehtävä ja hyväksyttävä oma RFD. Vastaavasti RFW koskee vain tiettyä yksilöä ja vastaavasta poikkeamasta toisessa yksilössä on tehtävä ja hyväksyttävä oma RFW.

Vapautusten pyyntö ja myöntö ovat sopimusteknisiä menettelyjä. Niitä edeltää yleensä poikkeamaraportti (NCR, engl. Non-Conformance Report). Raportti on määrämuotoinen [36, s. 27–31] ja sisältää toimittajan kuvauksen poikkeamasta ja analyysin syystä. Raportti tehdään myös yksinkertaisista ongelmista, joihin toimittaja on jo löytänyt ratkaisun. Esimerkki tästä olisi testauksessa paljastunut viallinen komponentti, joka on vaihdettu uuteen. Samoin raportti tehdään, mikäli as-built ei vastaa as-

designed:a. Esimerkki tästä olisi suunnittelusta poikkeavan, mutta ominaisuuksiltaan vastaavan, komponentin käyttö.

### 3.2.3. Varoitukset

Poikkeamaraportti saattaa johtaa varoituksen (engl. alert) julkaisuun. Varoitus kuvaa virhetoiminnan järjestelmässä tai ongelman materiaalissa, prosessissa tai suunnittelussa. Komponentteihin liittyvä ongelma saattaa koskea vain tiettyä komponenttimallia tai valmistuserää. Yksi varoituksen julkaisemisen peruste on, että ongelma saattaa olla läsnä muidenkin valmistajien tuotteissa tai ilmetä myös tulevaisuudessa.

Varoituksen julkaisee järjestö tai yritys rajoitetulle kohderyhmälle ja varoitus on luottamuksellinen. Pienimmillään jakelu on yritykseltä mission alijärjestelmätoimittajille. Toisaalta ESA:n varoitusjärjestelmä (EAS, engl ESA Alert System) kattaa kansallisten jäsenjärjestöjen lisäksi ESA:lle järjestelmiä toimittavat teollisuusyritykset. Liitteessä 1 [37, s. 17] on kuvattu EAS:n prosessi, koska se on julkinen. Muiden tahojen varoitusjärjestelmät oletetaan samankaltaisiksi.

Varoitus kuvaa ongelman ja sen syiden selvittämiseksi tehdyt toimenpiteet. Ilmoituksessa annetaan myös ohjeita tai määräyksiä ongelman välttämiseksi. Nämä saattavat myöhemmin tulla osaksi standardeja.



## 4. AVARUUSELEKTRONIIKAN SUUNNITTELUN ERITYISPIIRTEITÄ

Elektroniikkayksikkö tai -kortti on yleensä osa satelliitin runkoa tai osa hyötykuorman mitta- tai toimilaitetta. Satelliitin suunniteltu lentorata ja käyttöaika määrittävät elektroniikan ympäristö- ja muut vaatimukset. Nämä vaatimukset kuvataan alijärjestelmien toimittajille tarkoitetussa dokumentaatiossa.

Avaruuselektroniikan suunnittelussa käytetään usein aikaisempaa suunnittelua pohjana uudelle suunnittelulle. Tämä aiheutuu käytettävissä olevasta rajoitetusta komponenttivalikoimasta ja kytkentöjen analysoinnin raskaudesta. Tässä luvussa esitellään tarkemmin suunnittelussa ja hankinnassa huomioitavia seikkoja.

Oletettava aikaisemman suunnittelun hyödyntäminen on merkittävin syy kirjaston perustamiselle. Sopivien funktioiden valitsemiseksi tulee kirjastoon tallentaa, pelkän kytkentään ja suorituskykyyn liittyvien asioiden lisäksi, myös hankinnan ja valmistuksen kannalta olennaisia seikkoja.

### 4.1. Suunnitteluprosessi

Suomalaisen yrityksen näkökulmasta suunnittelu on lähes aina osa ulkoisen asiakkaan suurempaa kokonaisuutta. Eurooppalaisessa kaupallisessa ja varsinkin tieteellisessä avaruusprojektissa osakokonaisuuksien suunnittelu jakautuu useille yrityksille tai tiedeyhteisöille, jotka vielä käyttävät omia alihankkijoitaan.

Aikaisemmin mainittu BepiColombo-missio on ESAn ja Japanin avaruusjärjestön (JAXA, engl. Japanese Aerospace Exploration Agency) yhteishanke. Yksi tiedeinstrumenteistä on röntgensäteilyä mittaava MIXS/SIXS-instrumentti, joka on Leicesterin yliopiston ja Helsingin yliopiston yhteishanke. Patria Aviation suunnittelee, valmistaa ja testaa instrumentin tietojenkäsittelyosan, joka on yksittäinen piirikortti.

#### 4.1.1. Tarjouslaskenta

Kuten tavanomaisessa elektroniikkateollisuudessa, järjestelmän toimittaja kilpailuttaa alihankkijoita tarjouspyynnöllä. Avaruusprojekteissa tarjouspyyntö voi määritellä tarjouksen sisällön ja esitysmuodon yksityiskohtaisesti. Esimerkiksi EADS Astrium:n ohjeistus Sentinel-2-mission Remote Interface -yksikön tarjouksen sisällöstä oli 12-sivuinen [38, s. 10–21].

Tarjousmateriaalin tuottamiseen on rajattu aika, ja materiaali saattaa laajimmillaan olla satoja sivuja. Tyypillisesti tarjous on toimitettava kuusi viikkoa tarjouspyynnön julkaisusta. Osa tästä ajasta kuluu tarjousmateriaalien kuljettamiseen ja yritys- tai konsernitaseisiin taloudellisiin hyväksyntämenettelyihin. Käytännössä työaikaa on noin

viisi viikkoa. Yrityksen tarjous yllä mainitusta yksiköstä sisälsi yhteensä 774 sivua seuraavissa osissa:

- Cover Letter (6 sivua)
- Volume I Technical Proposal (including Product Assurance) (303 sivua)
- Volume II Management and Implementation Proposal (141 sivua)
- Volume III Financial and Contractual Proposal (122 sivua)
- Volume IV Exceptions and non-compliances (193 sivua)
- (Volume V, jota ei ollut, olisi käsitellyt alihankkijoita.)
- Volume VI Proposed Options (9 sivua)

Yksikkö koostui 14 elektroniikkakortista, näiden liitynnöistä ja mekaniikasta. Elektroniikkakortteja oli kuutta eri tyyppiä. Korttien määrä vaikutti merkittävästi ainoastaan teknisen osan (Vol. I) sivumäärään.

Tarjouspyynnössä määritellään yleensä mallifilosofia (engl. model philosophy), joka määrittelee, minkälaisia malleja tuotteesta valmistetaan. Mallifilosofialla pyritään saavuttamaan riittävä varmuus tuotteen luotettavuudesta siten, että suunnittelu ja kustannukset suhteessa riskeihin on minimoitu [35 s. 9]. Eri mallit valmistuvat projektin eri vaiheissa, ja niitä käytetään eri tarkoituksiin. Mallifilosofiaa on kuvattu alaluvussa 4.1.3.

Tarjouslaskenta perustuu tarjottavan elektroniikkakortin tai -yksikön alustavaan suunnitteluun. Suunnittelu saattaa olla yksityiskohtaista etenkin rajapintojen osalta, sillä tarjouspyyntö saattaa vaatia rajapintojen toteutuksen esittelyn komponenttitasolle asti. Esisuunnittelussa hyödynnetään mahdollisuuksien mukaan aikaisemmissa projekteissa toteutettua suunnittelua.

Komponenttikustannukset saattavat muodostaa 50–60 % tarjouksen arvosta. Yksittäiset erillispulijohdekomponentit voivat maksaa tuhansia euroja, monimutkaiset integroidut piirit kymmeniä tuhansia euroja. Tätä on tarkemmin esitelty alaluvussa 4.3.3 ja liitteessä 3. Testaamisen ja vaatimusten todentamisen vuoksi kustakin elektroniikkakortista tehdään useita malleja, joten tarjousvaiheessa täytyy olla oikeansuuntainen arvio tarvittavista komponenteista ja niiden lukumääristä.

Tarjouslaskennassa arvioidaan myös työmäärää ja aikataulutusta. Näissä arvioissa kokemukset aikaisemmasta suunnittelusta ovat ensiarvoisen tärkeitä. Aikataulun lisäksi tarjouspyyntö vaatii tärkeimpien henkilöresurssien nimeämistä. Tällä tarjouksen pyytäjä haluaa varmistua siitä, että tarjoajalla on osoittaa kyseiset resurssit eivätkä nämä ole samanaikaisesti useiden projektien kuormittamia.

Tarjouslaskennan tekevässä ryhmässä on yleensä suunnittelijoita, jotka tarjouksen tekohetkellä työskentelevät aikaisemman projektin parissa. Tarjouslaskennan sujuva eteneminen vapauttaa heidät mahdollisimman nopeasti takaisin näihin työtehtäviin.

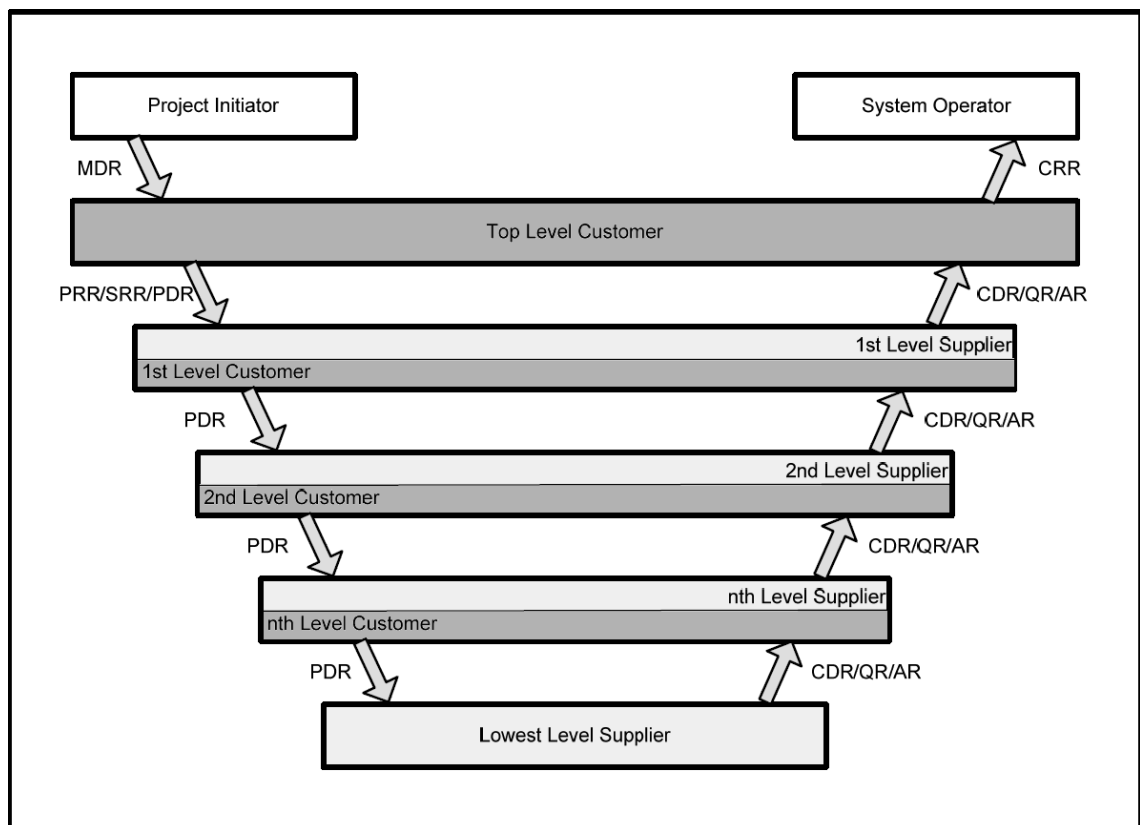
#### 4.1.2. Suunnittelun vaiheet ja katselmoinnit

Avaruusjärjestelmän suunnittelu etenee yleensä tiettyjen etappien kautta. Vastaavat etapit ovat myös alijärjestelmillä. Vaiheesta toiseen siirrytään katselmointien kautta. Katselmointimenettelyä on ohjeistettu standardissa ECSS-M-ST-10-01 [39].

Katselmointia ennen toimittaja lähettää datapaketin eli katselmoitavan dokumentaation asiakkaalle. Asiakkaan katselmointiryhmä tutustuu dokumentaatioon ja tarvittaessa tekee RID:itä (engl. Review Item Discrepancy). RID:t ovat dokumentaatiossa havaittuja puutteita, poikkeamia tai epä johdonmukaisuuksia. Niistä pidetään kirjaa läpi projektin.

RID:iin kirjataan kohteena oleva dokumentti ja havainto sekä arvio merkittävyydestä. Katselmoinnissa sovitaan mahdolliset toimenpiteet (engl. action item), kuten dokumentin päivittäminen. Toimenpiteiden suorittamisen jälkeen RID kirjataan suljetuksi.

Järjestelmän alustava määrittely tapahtuu ylhäältä alas, suuremmasta kokonaisuudesta pienempään. Pienemmät kokonaisuudet suunnitellaan, hyväksytään ja integroidaan ylempään tasoon. Tätä on kuvattu liitteessä 2 [40 s. 19] ja kuvassa 1.



**Kuva 1.** Katselmointien suorittamisjärjestys [40 s. 21].

Yksittäisellä elektronikkakortilla tai -yksikölläkin on alustava määrittelyvaihe, yksityiskohtainen määrittelyvaihe sekä kelpuutus- ja tuotantovaihe. Ennen alustavaa määrittelyvaihetta tuote on todettu toteuttamiskelpoiseksi ja alustavat vaatimusmäärit-

telyt on laadittu. Kelpuutus- ja tuotantovaiheen jälkeen yksikkö yleensä lähtee asiakkaalle integroitavaksi järjestelmään. [40 s. 20, 23–26.]

Alustavassa määrittelyvaiheessa yksikön rakenne eli tuotepuu määritellään ja elektroniikkakortit suunnitellaan pääpiirteissään. Suunnittelun rinnalla tehdään alustavat analyysit. Rajapinnat toisiin alijärjestelmiin suunnitellaan yksityiskohtaisesti. Vaiheen päättää alustavan suunnittelun katselmointi (PDR, engl. Preliminary Design Review). Yleensä tämän yhteydessä määrittyy sopimuksenmukainen lähtökohta (ks. alaluku 3.2.2).

Yksityiskohtaisessa määrittelyvaiheessa suunnittelu tarkentuu lopulliseen muotoonsa. Vaiheen aikana, mallifilosofiasta riippuen, valmistetaan yleensä tekninen malli ja kelpuutusmalli tai näiden yhdistelmä. Vaiheen päättää yksityiskohtaisen suunnittelun katselmointi (CDR, engl. Critical Design Review). Suunnitteludokumentaatio saavuttaa as-designed-tilan.

Kelpuutus- ja tuotantovaiheessa pidetään ennen valmistuksen aloittamista valmistusvalmiuskatselmointi (MRR, engl. Manufacturing Readiness Review). Samoin ennen testauksen aloittamista pidetään testivalmiuskatselmointi (TRR, engl. Test Readiness Review). Testauksen tulokset hyväksytetään asiakkaalla testitulosten katselmoinnissa (TRB, engl. Test Review Board).

Tuote on as-built ja erot as-designed:iin dokumentoidaan. Vaatimustenmukaisuus osoitetaan todentamisdokumentaatiolla kelpuutuskatselmoinnissa (QR, engl. Qualification Review). RFD:t ja RFW:t todetaan hyväksytyiksi ja pidetään toimituskatselmointi (DRB, engl. Delivery Review Board), jonka jälkeen asiakas vastaanottaa tuotteen. Asiakas integroi tuotteen suurempaan osakokonaisuuteen ja tekee sille oman testisarjansa. Tämän jälkeen tuote hyväksytään hyväksyntäkatselmoinnissa (AR, engl. Acceptance Review).

#### **4.1.3. Mallifilosofia**

Avaruuselektroniikan suunnittelussa on tyypillistä, että kortista tai yksiköstä suunnitellaan ja valmistetaan useita erilaisia malleja. Valmistettavat mallit riippuvat projektista. Tätä mallien valintaa ja käyttöä kutsutaan mallifilosofiaksi.

Mallifilosofia päätetään yleensä jo järjestelmän määrittelyvaiheessa, jolloin suunnitellaan myös osakokonaisuuksien integrointiaikataulu. Kussakin mallissa käytettävät komponentit saattavat erota suuresti toisistaan. Samoin eroavat malleille tehtävät ympäristötestit, joita on kuvattu alaluvussa 4.4.5. Alla mallit on esitetty suunnittelun etene-  
misen kannalta käänteisessä järjestyksessä.

Lentomalli (FM, engl. Flight Model) on suunnittelun tavoite. Lentomallissa käytettävät komponentit on hyväksyttävä. Ne ovat oletusarvoisesti lentokelpoisia ja vaatimusten määräämää laatuluokkaa.

Varalentomalli (FS, engl. Flight Spare) vastaa täysin lentomallia. Sopimus määrittelee, valmistetaanko ja testataanko FS vai hankitaanko vain komponentit sitä varten. Myös kelpuutusmalli (QM, engl. Qualification Model) vastaa lentomallia kompo-

nenttien osalta. QM kuitenkin altistetaan testauksessa FM:ää voimakkaammille rasituksille.

Tekninen malli (EM, engl. Engineering Model) valmistetaan yleensä komponenteista, jotka muistuttavat ulkoisesti lentomallin komponentteja. Ne saattavat olla samoja kuin kelpuutusmallissa, mutta useat valmistajat tekevät komponenteistaan myös teknistä mallia varten edullisempia versioita, joita ei ole tarkoitettu ympäristötestien olosuhteisiin. EM:ää käytetään suunnittelun toiminnan todentamiseen.

Rakenne- ja lämpömalli (STM, engl. Structural and Thermal Model) vastaa lentomallia massaltaan, mekaanisilta mitoiltaan ja lämmönsiirto-ominaisuuksiltaan. STM:ssä ei ole sähköistä toiminnallisuutta. Huomattavimpien lämmönlähteiden kohdalla on lämmittimet. STM:ää käytetään alustavissa integraatiotesteissä, joissa yksiköille ja suuremmille kokonaisuuksille tehdään värinä- ja lämmönjohtumistestejä. Tietokonesimulaatioiden kehittyminen on vähentänyt etenkin lämmönjohtumisen kokeellisen testaamisen tarvetta.

Prototyypillä testataan yleensä kytkennän yleisiä toimintaperiaatteita. Prototyypissä voidaan käyttää teollisuuskäyttöön tarkoitettuja komponentteja, jotka ovat yleisesti saatavilla olevia ja edullisia. Tällöin suunnittelijan on kuitenkin tarkasteltava kriittisesti, kuinka hyvin suorituskyky ja kytkennän vaatima piirilevy-pinta-ala vastaavat lopullista mallia. Prototyyppeihin ja teknisiin malleihin voidaan asentaa myös esimerkiksi kelpoisaikansa (ks. alaluku 4.3.5) ohittaneita lentokelpoisia komponentteja.

Tuotteen mallifilosofiassa ei ole välttämättä kaikkia yllä esitettyjä malleja, tai niitä on voitu yhdistää. Tekninen kelpuutusmalli (EQM, engl. Engineering Qualification Model) vastaa sähköisesti ja mekaanisesti lentomallia, mutta monimutkaisemmat komponentit eivät yleensä ole säteilysietoisia. Yksinkertaisessa mallifilosofiassa voidaan valmistaa pelkkä protolentomalli (PFM, engl. Protoflight Model). PFM:lle tehtävä testaus on rasittavuudeltaan FM:lle ja QM:lle tehtävien testien välillä.

Mission määrittely tai osakokonaisuudesta vastaava taho saattavat asettaa reunaeh-toja mallifilosofialle tai malleissa käytetyille komponenteille. Esimerkiksi BepiColombo-mission teknisten mallien EEE-komponenttien pitää olla samalta valmistajalta ja samalla tekniikalla tuotettuja kuin lentomallin komponentit [41 s. 323]. Vastaavasti MIXS/SIXS-instrumentin testilaitteita testataan toisiinsa integroiduilla teknisillä malleilla, joten tietojenkäsittelyosan ja tehölähdeosan EM:ien täytyy olla soveltuvien osien mekaanisesti yhteensopivia.

Prototyypeissä ja teknisissä malleissa käytettäväksi tarkoitetut komponentit saattavat tulla täysin samasta tuotantoprosessista kuin lentokelpoiset komponentit. Niitä ei välttämättä ole kuitenkaan testattu yhtä kattavasti. On myös mahdollista, että valmistajat myyvät prototyypikäyttöön komponentteja, jotka eivät testeissä täyttäneet suorituskykyvaatimuksia esimerkiksi lämpötila-alueen ääripäissä. Näistä syistä johtuen prototyypikäyttöön tarkoitettuja komponentteja ei pitäisi käyttää kelpuutusmallissa.

Lisäksi valmistaja saattaa esimerkiksi porata koteloon reiän tai käyttää materiaaleja, jotka eivät ole kaasutiiviitä, estääkseen prototyypitasoisen komponentin käytön lento-

elektroniikassa. Tällaiseen käytäntöön saattaa osaltaan vaikuttaa se, että lentokelpoisiin komponentteihin kohdistuu kaupallisia rajoituksia, joita on kuvattu alaluvussa 4.3.2.

#### 4.1.4. Tekniset budjetit ja listat

Elektroniikkaa kuvaavien suunnitteludokumenttien ohella valmistaja ylläpitää teknisiä budjetteja ja listoja. Avaruusjärjestelmän massan ja käytetyn sähkötehon täytyy pysyä niille määritellyissä rajoissa, joten niistä laaditaan budjetit. Budjetteja päivitetään suunnittelun edetessä. Valmistaja ilmoittaa käyttämänsä komponentit, prosessit ja materiaalit teknisillä listoilla, jotka asiakas hyväksyy.

Järjestelmän massabudjetissa jyvitetään tietyt osuudet alijärjestelmille. Alijärjestelmillä on vastaavasti omat budjettinsa, joissa ovat edustettuina myös yksittäiset elektroniikkakortit. Kortin piirilevyn pinta-ala on merkittävä tekijä, sillä sen kasvaessa myös tukeva mekaniikka kasvaa. Mikäli jokin osa pystytään tekemään budjetoitua kevyemmäksi, budjetista vapautuu massaa muiden osien käytettäväksi. Mikäli jotain alijärjestelmää, esimerkiksi tiedeinstrumenttia, ei liitetäkään järjestelmään, sen tilalle asennetaan mekaanisesti vastaava rooliosa. Tällöin järjestelmän laukaisu-, lentorata- ja rakennesuunnittelu säilyvät paikkansapitävinä.

Tehobudjetin perusteella arvioidaan järjestelmän tehonkulutusta eri toimintatiloissa ja mitoitetaan tehontuotto-osia. Alijärjestelmän kuluttama teho määrittää, kuinka usein tai millä kuormituksella sitä voidaan käyttää. Tehobudjettia varten alijärjestelmätoimittaja ilmoittaa esimerkiksi keskimääräisen tehonkulutuksen ja huippukulutuksen. Kulutukset arvioidaan eri olosuhteissa, kuten auringossa ja varjossa. Arvioihin sisällytetään myös analyysieihin perustuva komponenttien ikääntymisen vaikutus.

Valmistaja hyväksyttää asiakkaalla käyttämänsä komponentit, jotka ilmoitetaan listassa (DCL, engl. Declared Components List). DCL:ssä komponenttien mallit yksilöidään ja ilmoitetaan, minkä yksityiskohtaisen vaatimusmäärittelyn mukaisia ne ovat. Mikäli komponentti ei ole lentokelpoinen, viitataan siitä tehtyyn PAD:iin.

Valmistaja hyväksyttää vastaavasti myös valmistuksessa käytetyt prosessit ja mekaaniset osat sekä materiaalit. Nämä ilmoitetaan DPL:ssä (engl. Declared Processes List), DMPL:ssä (engl. Declared Mechanical Parts List) ja DML:ssä (engl. Declared Materials List). Listoissa viitataan standardeihin ja määrittelyihin. Valmistusprosessien osalta voidaan lisäksi viitata erillisiin työohjeisiin. Valmistukseen kohdistuvia vaatimuksia on kuvattu alaluvussa 4.4.

#### 4.1.5. Analyysimenetelmät

Avaruudessa elektroniikka altistuu alaluvussa 4.2 kuvatuille haastaville olosuhteille. Lisäksi korjaaminen on yleensä mahdotonta, joten elektroniikan on oltava luotettavaa ja toivuttava hyvin vikatilanteista. Tarvittavien varmuusmarginaalien saavuttamiseksi suunnittelua analysoidaan useilla tavoilla.

Analyysit perustuvat mission parametreille, joita ovat mm. lentoaika kohteeseen, toiminta-aika kohteessa ja laukaisuun käytetty kantoraketti. Näistä on edelleen johdettu

lämpötilavaihteluiden laajuus ja taajuus, säteilyn voimakkuus ja kokonaisuus sekä tärinä. Edellä mainittuihin vaikuttaa myös elektroniikan sijainti satelliitin mekaniikassa. Yleensä analyyseissä käytettävät parametrit ilmoitetaan mission määrittelyssä.

Parhaassa tapauksessa analysointia tehdään suunnittelun rinnalla ja analyysien tulokset ohjaavat suunnittelua luotettavampaan suuntaan. Mitä aikaisemmin luotettavuusriski havaitaan, sitä helpompia ja nopeampia ovat korjaavat toimenpiteet. Vastavasti myöhään havaitut riskit aiheuttavat yleensä aikataulu- ja resurssiongelmia, jotka heijastuvat myös muihin projekteihin.

Yleisesti käytettyjä analyysimenetelmiä on käsitelty tarkemmin [2]:ssa. Niitä ovat seuraavat:

- lämpöanalyysi
- mekaniikka-analyysi
- säteilyanalyysi
- EMC-analyysi
- turvallisuusanalyysi
- suorituskykyanalyysi
- rasitusanalyysi
- vika- ja vaikutusanalyysi
- luotettavuusanalyysi.

Lämpöanalyysi ja mekaniikka-analyysi ohjaavat järjestelmän mekaniikkasuunnittelua. Ne vaikuttavat myös elektroniikkasuunnitteluun, etenkin komponenttien tehonkestoon ja piirilevy-suunnitteluun. Näihin vaikuttavia ympäristötekijöitä on esitelty alaluvussa 4.2.1. Säteilyanalyysi ohjaa mekaanista suunnittelua ja komponenttien valintaa. Säteilyn vaikutuksia on esitelty alaluvussa 4.2.2.

EMC-analyysissä (engl. Electromagnetic Compatibility) käsitellään järjestelmän häiriöiden sietoa ja aiheuttamista sekä staattisen sähköön purkausten sietoa. Analyysi ohjaa erityisesti rajapintojen suunnittelua, kuten tehonsyöttöä, maadoitusta ja tiedonsiirtoa. Turvallisuusanalyysillä arvioidaan, mitä riskejä järjestelmä aiheuttaa käyttäjille, ympäristölle, muulle lentolaitteelle tai toisille lentolaitteille. Riskien todennäköisyys pitää olla hyväksyttävissä suhteessa niiden vakavuuteen.

Suorituskykyanalyysissä (WCA, engl. Worst Case Analysis) arvioidaan järjestelmän kriittisiä toimintoja. Analyysillä varmistetaan, että suorituskyky säilyy läpi toimintajan toimintaympäristössä. Analyysi perustuu lämpö- ja säteilyanalyysien tuloksiin sekä komponenttien vanhetessa tapahtuvaan toleranssien muutoksiin. Analyysistä käytetään myös nimitystä WCCPA (engl. Worst Case Circuit Performance Analysis).

Rasitusanalyysillä (PSA, engl. Parts Stress Analysis) varmistetaan, että käytettävät komponentit kestävät niihin kohdistuvat sähköiset rasitukset. Avaruuselektroniikan suunnittelussa ei komponentteja altisteta niiden ilmoitetulle maksimikestolle, vaan käytetään varmuuskertoimia. Tätä rasitusvaran jättämistä (engl. derating) on ohjeistettu standardissa ECSS-Q-ST-30-11 [42], mutta varmuuskertoimet voivat olla myös projekti-kohtaisia.

Vika- ja vaikutusanalyysi (FMEA, engl. Failure Modes and Effects Analysis) määrittelee, mitä kunkin osajärjestelmän vikaantuminen aiheuttaa. Vikaantumisen vaikutusta vähennetään suunnittelemalla osajärjestelmään redundanssia eli varmennuksia, jotka korvaavat vikaantuneen funktion. Yksittäistä vikaa, joka estää osajärjestelmän toiminnan, kutsutaan SPF:ksi (engl. Single Point Failure). SPF:iä pyritään välttämään, eikä niitä saa olla redundanttisessa osajärjestelmässä.

Analyysin taso riippuu analysoitavan alijärjestelmän tärkeydestä. Yksityiskohtaisimmillaan analyysi voidaan suorittaa jokaiselle komponentille. Mikäli analyysi määrittelee myös vikatilanteen kriittisyyden, siitä käytetään nimitystä FMECA (engl. Failure Modes, Effects and Criticality Analysis). Kriittisyyden perusteella määritellään, onko vikatilanne hyväksyttävissä vai onko suunnittelua muutettava sen estämiseksi.

Luotettavuusanalyysissä lasketaan järjestelmälle vikaantumistodennäköisyys toiminta-aikana. Analyysi perustuu komponenteille määritettyihin vikataajuuksiin ja komponenttien lukumäärään. Analyysi voidaan tehdä myös yksityiskohtaisemmin, jolloin tarkastellaan komponentteihin kohdistuvaa lämpö- ja sähköistä rasitusta.

## 4.2. Komponenttien erityispiirteitä

Avaruus on elektroniikalle haastava ympäristö. Komponentteihin vaikuttavat muun muassa laukaisun värinä ja kiihtyvyys, lämpötilan vaihtelut, tyhjiön paineettomuus sekä säteily. Säteilyä on useaa tyyppiä, jotka vaikuttavat komponenttien toimintaan väliaikaisesti tai pysyvästi.

Lentokelpoiset komponentit perustuvat sotilas- ja muissa korkean luotettavuuden sovelluksissa käytettyihin komponentteihin. Niissä käytetään koteloita, jotka eroavat teollisuuden komponenttien koteloista materiaaleiltaan ja malleiltaan.

### 4.2.1. Avaruusympäristön aiheuttamia vaatimuksia

Kiihtyvyyden ja värinän sietovaatimukset riippuvat missiosta. Suurimmat voimat eivät välttämättä aiheudu laukaisussa. Esimerkiksi BepiColombo-missiossa kaksi satelliittia lentää aluksi yhdessä ja shokkitestien hyväksyntäraja 1000 g perustuu voimiin, jotka aiheutuvat satelliittien irtautumisesta toisistaan [41 s. 79]. Elektroniikan sijainti ja kiinnitys vaikuttavat elektroniikkaan kohdistuviin voimiin ja mekaniikka-analyysi saattaa vaikuttaa esimerkiksi oskillaattoreiden tai muiden värinälle alttiiden komponenttien sijoitteluun.

Avaruudessa komponenttien tuottama lämpö siirtyy johtumalla ja vähäisessä määrin säteilemällä. Lämpöteho johdetaan yleensä yksikön rakenteisiin ja satelliitin rungon kautta säteilijöihin. Toisaalta pienitehoista elektroniikkaa täytyy lämmittää, jotta sen lämpötila saadaan komponenttien toiminta-alueelle. Lentokelpoisten komponenttien toimintalämpötila-alue on yleensä -55...+125 °C. Lämpöanalyysi ja PSA vaikuttavat elektroniikkaan ja mekaniikkaan.

Lämpö vaikuttaa myös piirilevyyn. Eristemateriaalina käytetään yleensä polyimidiä lasikuituvahvisteisen epoksimuovin sijaan, sillä polyimidin lämpölaajenemiskerroin on



vakaa laajalla lämpötila-alueella ja lähellä kuparin vastaavaa. Teollisuuselektronikasta poiketen levyillä ei ole juotteenestopinnoitetta tai silkkipainatusta. Kokoonpanon ja testauksen jälkeen elektronikkakortti lakataan hapettumista estävällä lakalla.

Laukaisun jälkeen paine alenee lopulta tyhjiöön. Alhaisessa paineessa materiaaleista alkaa irrota molekyylejä. Tämä höyrystyminen aiheuttaa materiaalin heikentymistä ja toimintaongelmia, sillä irtoava aine muodostaa kalvon järjestelmän pinnoille haitaten optisten laitteiden toimintaa. Höyrystynyt aine saattaa myös olla herkästi syttyvää tai aiheuttaa korroosiota.

Tämän vuoksi avaruusjärjestelmissä käytetään materiaaleja, joilla on vähäinen kaasunpoistuma. Järjestelmiä käsitellään puhdastiloissa ja niille tehdään kaasunpoisto epäpuhtauksien poistamiseksi. Kaasunpoistossa järjestelmää pidetään  $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$ :n lämpötilassa ja  $10^{-3}\text{ Pa}$ :n paineessa vuorokausi [43 s. 13].

Materiaalien kaasunpoistumaa testattaessa materiaali punnitaan ennen kaasunpoistoa ja sen jälkeen. Mitä vähemmän massa on vähentynyt, sitä vähemmän kaasua on poistunut. Kaasunpoiston jälkeen massa hieman kasvaa kohti lähtötilannetta, sillä vesi-höyryä sitoutuu takaisin materiaaliin.

Alhainen ilmanpaine myös pienentää läpilyöntijännitettä. Tämä on huomioitava rasisitusvaraa jätettäessä etenkin järjestelmissä, jotka ovat toiminnassa ilmakehässä lennon aikana. Esimerkiksi D-liittimen 340100201B maksimijännite on merenpinnan tasolla  $300\text{ V}_{\text{rms}}$ , mutta 33 000 m:n korkeudessa  $250\text{ V}_{\text{rms}}$  [16 s. 7].

#### 4.2.2. Säteily ja sen sieto

Avaruudessa järjestelmä altistuu varautuneille hiukkasille eli säteilylle. Hiukkasten tyypit ja varaukset riippuvat järjestelmän lentoradasta ja toimintaympäristöstä. Säteilylajeja ja hiukkasten ominaisuuksia on tarkemmin kuvattu esimerkiksi [2]:ssa ja [44]:ssä.

Komponentteihin säteily vaikuttaa kolmella tavalla. Puolijohteet ionisoituvat, kun niihin siirtyy energiaa törmäävistä varautuneista hiukkasista. Riittävän suurienerginen hiukkanen aiheuttaa yksittäisiä tilamuutoksia. Vähitellen puolijohteen varauksenkuljettajat poikkeutuvat hilarakenteesta.

Ionisoituminen vaikuttaa erityisesti CMOS-tekniikalla (engl. Complementary Metal Oxide Semiconductor) toteutettuihin puolijohdepiireihin. Varauksen kertyminen MOSFET:n (engl. Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor) hilalle muuttaa kynnysjännitettä ja ajoituksia sekä lisää vuotovirtaa. Lopulta komponentti muuttuu toimimattomaksi. Bipolaaritransistoreilla toteutetut komponentit sietävät ionisoitumista paremmin, mutta immuuneja nekään eivät ole. Sietoa kuvataan ionisoivan säteilyn kokonaisannoksella (TID, engl. Total Ionizing Dosage).

Bipolaaritransistorit ovat alttiita erittäin alhaisen tason pitkäkestoiselle säteilylle. Vikaantumista tapahtuu, vaikka kokonaisannos on pienempi kuin tavallisilla testeillä todennettu säteilyn sieto. Tästä ilmiöstä käytetään nimitystä ELDRS (engl. Enhanced Low Dose Rate Sensitivity). Alttius koskee transistoreja ja integroitua piirejä ja vaihtelee piirimalleittain. Avaruusjärjestöt ja osa valmistajista ovat alkaneet 2000-luvun ensimmäisen vuosikymmenen loppupuolella testata komponentteja myös ELDRS:n

suhteen. Yhä useammassa missiossa edellytetään käytettävän komponentteja, joiden säteilyn sieto myös ELDRS:n suhteen tunnetaan. [45.]

Yksittäiset tilamuutokset (SEE, engl. Single Event Effects) aiheutuvat, kun varautunut hiukkanen aiheuttaa piirin kytkintransistorin tilan vaihtumisen. Tilapäinen tilamuutos aiheuttaa signaalin tilan lyhytaikaisen vaihtumisen. Muistipiirissä saattaa tapahtua pysyvä tilamuutos, jolloin muistisolun tila vaihtuu. Vakavimmillaan varautunut hiukkanen aiheuttaa kytkintransistorin lukkiutumisen oikosulkuun, joka poistuu vasta kun piiri tehdään jännitteettömäksi, ellei piiri ehdi tuhoutua. Sietoa kuvataan energiansiirtokyvyn kynnysarvolla (LETth, engl. Linear Energy Transfer threshold). LETth määrittää vähimmäisenergian, joka vaaditaan tilamuutoksen aiheuttamiseksi.

Poikkeutumisen takia puolijohteen virransiirtokyky vähenee. Tämä alentaa esimerkiksi aurinkopaneelien tehoa tai tekee optoerottimen toimimattomaksi. Poikkeutumista aiheuttavat eniten protonit. Mikäli järjestelmä altistuu niille voimakkaasti, kokonaisuus täytyy arvioida niiden osalta erikseen.

Komponentin laatuluokka (ks. alaluku 3.1.4) ei määrittele, miten komponentti sietää säteilyä. ESCC-järjestelmä ei ota kantaa komponentin säteilysietoon. MIL-standardit määrittelevät erillispulijohdekomponenteille, integroiduille piireille ja hybridipiireille säteilysietoluokat (RHA, engl. Radiation Hardness Assurance). RHA-luokat ja niitä vastaavat TID:t on esitetty taulukossa 5. Kaikkia luokkia ei ole määritelty kaikille komponenteille, vaan säteilysietoiset komponentit ovat tyypillisesti luokkaa R.

*Taulukko 5. RHA-luokkien TID.*

RHA-luokka	- tai /	M	D	P	L	R	F	G	H
TID krad	ei määritelty	3	10	20	50	100	300	500	1000

RHA-luokka ei määrittele alttiutta SEE:ille. Komponenttivalmistaja ilmoittaa komponenttimalleille tekemänsä testit ja niiden perusteella LETth:n. Valmistaja saattaa kuvata testit ylimalkaisesti tai ei lainkaan. Tällöin komponentin käytön hyväksyttäminen asiakkaalla saattaa vaikeutua, vaikka komponentille ilmoitettu SEE-sieto täyttäisikin mission vaatimukset.

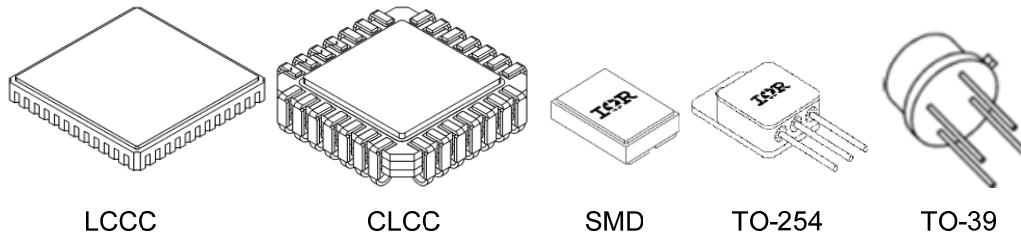
Mission parametrit määrittelevät erikseen vaaditun säteilyn siedon. Se voidaan määritellä fysikaalisena arvona tai säteilysietoluokkana. Tietyn piirin lopulliseen vaatimukseen vaikuttavat myös elektroniikan sijainti järjestelmässä ja ympäröivät materiaalit. Säteilysietovaatimukset määritellään eri säteilytyypeille. Esimerkiksi BepiColombo-missiossa vaaditaan komponenttien sietävän 75 krad:n TID [41, s. 366]. Tätä alempi sieto aina 20 krad:n TID:hen saakka on hyväksyttävissä, mikäli analyyseillä voidaan osoittaa, että komponentti on riittävästi suojattu. Vastaavasti määritellään LETth:n minimitaso ja analyysit, joita komponentin LETth:n perusteella on tehtävä.

SEE:ien mahdollisuus vaikuttaa suunnitteluun. Tilapäinen tilamuutos ei saa liipaista epätoivottuja toimintoja, kuten reset-tilaa. Luku- ja kirjoitusmuistiin käytetään virhetarkastelua ja virheenkorjausta, tai muisti on moninkertaista ja varustettu äänestävällä

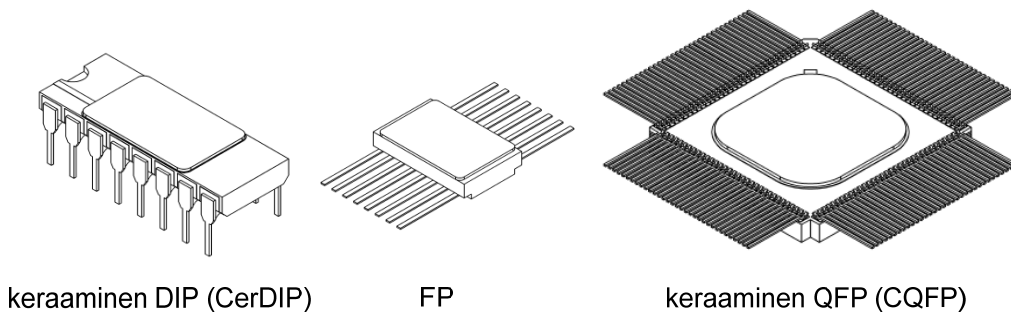
logiikalla. Ohjelmoitavat logiikkapiirit ovat kertaohjelmoitavia. Lukkiutumislle alttiin piirin käyttöjännitesyöttöön voidaan suunnitella virtaraja tai katkaisukytke.

#### 4.2.3. Kotelotyypit

Avaruuselektroniikan komponentit ovat metallisissa tai keraamisissa kaasutiiviissä koteloiduissa. Valmistuksen ja käsittelyn aikana kaasutiiviys estää kosteutta pääsemästä kotelon sisään. Paineen pienentyessä tyhjiöksi kaasutiiviys säilyttää komponentit hallitussa tilassa. Käytetyt materiaalit myös parantavat lämmön johtumista verrattuna teollisuudessa käytettyihin muovisiin kotelotyyppisiin. Esimerkkejä tyypillisistä transistoreiden, FET:ien tai muiden erillispuolijohdekomponenttien kaasutiiviistä kotelotyypeistä on esitetty kuvassa 2. Esimerkkejä tyypillisistä integroitujen piirien kaasutiiviistä kotelotyypeistä on esitetty kuvassa 3.



**Kuva 2.** Tyypillisiä erillispuolijohdekomponenttien kotelotyyppisiä (ei mittakaavassa) [46; 47].



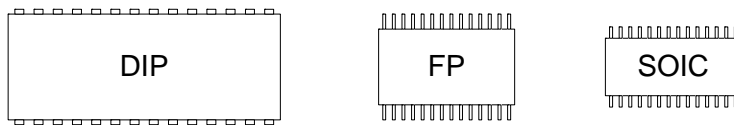
**Kuva 3.** Tyypillisiä integroitujen piirien kotelotyyppisiä (ei mittakaavassa) [47].

Kotelotyypit saattavat erota mitoitukseltaan samankaltaisista teollisuudessa käytetyistä kotelotyypeistä, mikä monimutkaistaa prototyyppien valmistamista. Läpiladottavat lentokelpoisten komponenttien kotelotyypit vastaavat mitoitusta, kuten DIP-kotelotyypit, tai ovat hyvin samankaltaisia, kuten erilaiset TO-kotelotyypit. Läpiladottavia piirejä vastaavien komponenttien käyttö prototyypeissä on yleensä yksinkertaista. Samoin pintaliitettävälle passiivikomponenteille löytyy vastineita.

Pintaliitettävät erillispuolijohdekomponentit ja integroidut piirit valmistetaan kotelotyyppisiin, joita käytetään vain avaruus-, sotilas- tai muissa korkean luotettavuuden sovelluksissa. Jos prototyyppi rakennetaan teknisen mallin piirilevyille, korvaava komponentti kiinnitetään sopivaan kohtaan ja sen jalat kytketään piirilevyyn johtimilla.

Monimutkaiset integroidut piirit, kuten ohjelmoitavat logiikkapiirit, ovat yleensä keraamisessa QFP-kotelossa. Nämä saattavat erota mitoitukseltaan teollisuudessa käytetyistä muovisista QFP-koteloista. Esimerkiksi piirivalmistaja Actel tarjoaa prototyyppien rakentamista varten keraamisten QFP-koteloiden mitoitusta vastaavia piirikantoja, joihin voidaan asentaa teollisuuteen tarkoitettu, samankaltaisen piirisarjan piiri [48].

Joissakin piirityypeissä ainoa saatavilla oleva malli saattaa olla DIP-koteloinen läpiladottava. Nämä kuluttavat merkittävästi enemmän piirilevypinta-alaa kuin vastaavat, teollisuudessa käytetyt pintaliitettävät SOIC-koteloiset mallit. Kuvassa 4 on esitetty luonnollisessa koossa olevat 28-jalkaiset esimerkit yllä mainituista kotelotyypeistä. SOIC-koteloita on kahta leveyttä, 300 mils ja 150 mils, joista kuvassa on leveämpi.



**Kuva 4.** Erikokoisia integroitujen piirien kotelointia.

Komponenttien viemää pinta-alaa voidaan käyttää arvioitaessa kytkennän vaatimaa piirilevypinta-alaa. Yksi lähtökohta on, että mekaniikkaan varataan tila piirilevylle, jonka yhden puolen pinta-ala on vähintään komponenttien yhteispinta-alan suuruinen. Monesti toki myös mekaniikka rajoittaa piirilevysuunnittelua, jossa on huomioitava tukirakenteet ja kiinnityspaikat.

Avaruuselektroniikan valmistajalta vaaditaan kelpuutus käytetyille asennusmenetelmille. Kelpuutus on kotelomallikohtainen, esimerkiksi 68-jalkaiselle CQFP-kotelolle vaaditaan oma kelpuutus ja 256-jalkaiselle kotelolle omansa. Valmistuksessa vaadittuja kelpuutuksia on tarkemmin kuvattu alaluvussa 4.4.1.

### 4.3. Komponenttien saatavuus

Lentokelpoisten komponenttien valikoima on erittäin rajoittunut ja hinnat korkeat, sillä ympäristövaatimukset komponenteille ja laatuvaatimukset tuotantoprosessille aiheuttavat valmistajille paljon työtä. Tuotantosarjat ovat pieniä. Tuotekehityksen ja kelpuutusten hankkimisen vaikeuden takia uusia malleja komponenteista tulee harvoin.

Edellä mainittujen syiden takia komponenttien hankinta on haastavaa. Saatavuus on epävarmaa ja toimitusajat ovat pitkät. Lisäksi hankintaa vaikeuttaa eurooppalaiselta näkökannalta komponenttiteollisuuden keskittyminen Yhdysvaltoihin.

#### 4.3.1. Merkittävät valmistajat

Avaruuslentokelpoisten komponenttien valmistajia on vähän suhteessa teollisuudessa käytettävien komponenttien valmistajiin. Suurilla valmistajillakin, kuten esim. National Semiconductor tai Texas Instruments, komponenttivalikoima on suppea verrattuna niiden teollisen puolen valikoimaan.

Tietyillä komponenttityypeillä voi olla maailmanlaajuisesti vain yksi tai pari valmistajaa. Esimerkiksi International Rectifier:lla on käytännön monopoli säteilysietoisten teho-MOSFET:ien tuotannossa. Yhtiö on ostanut muiden valmistajien tuotelinjoja tai kokonaisia yrityksiä itselleen.

Eurooppalainen komponenttiteollisuus pyrkii laajenemaan tietyille, vain yhdysvaltalaisen yhtiöiden hallitsemille, markkina-alueille. Tähän ajavat pitkät toimitusajat, jotka osaltaan saattavat johtua yhdysvaltalaisen ostajien suosimisesta, ja vientirajoitukset. Vuonna 2004 ESA käynnisti komponenttiprojektin (ECI, engl. European Component Initiative). Sen tavoitteena on järjestelmien komponenttien eurooppalaisuusteen kasvattaminen 50 prosenttiin ja eurooppalaisten komponenttien markkinaosuuden kasvattaminen. ECI:hin osallistuu ESAn lisäksi kansallisia avaruusjärjestöjä, erityisesti Ranskan CNES (ransk. Centre National d'Études Spatiales) ja Saksan DLR (saks. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt). [49.]

Projekti ei kuitenkaan ole sujunut ongelmitta. Toimitusajoissa ja laadunvalvonnassa on parannettavaa. Esimerkiksi ST Microelectronics:n vastuulle määriteltiin säteilysietoisten MOSFET:ien kehittäminen. Heinäkuussa 2008 päivätyn ensimmäisen vaiheen tilanneraportin mukaan MOSFET-tuoteperheen tilanne oli ”Recovery plan ongoing”, eikä piirejä ollut valikoimassa vielä helmikuussa 2010 [50].

Myös piirilevy on komponentti. Lentokelpoisten piirilevyjen tuotantoa käsittelevät standardit ECSS-ST-Q-70-10 [51] ja ECSS-ST-Q-70-11 [52]. Helmikuussa 2010 Euroopassa oli kolme piirilevyvalmistajaa, jotka ESA on kelpuuttanut [53]. Kuten komponenteilla, rajoitettu tarjonta vaikuttaa hintoihin ja toimitusaikoihin.

#### **4.3.2. Yhdysvaltojen vientirajoitukset**

Yhdysvalloissa valmistettujen komponenttien saatavuuteen vaikuttaa kaksi vientirajoitusta: Export Administration Regulation (EAR) ja International Traffic in Arms Regulation (ITAR). Näistä ITAR on huomattavasti rajoittavampi ja aiheuttaa enemmän työtä. Käytännössä yhdysvaltalaisen yhtiön valmistama komponentti kuuluu jommankumman rajoituksen piiriin. Tämä koskee myös muualla kuin Yhdysvalloissa sijaitsevassa toimipisteessä valmistettuja komponentteja.

EAR perustuu lakiin viennistä (Export Administration Act) ja sitä valvoo kauppaministeriö eli U.S. Department of Commerce. Ministeriö määrittelee maat ja tahot, joita rajoitus koskee. Näihin tai näille ei saa toimittaa EAR:n alaisia komponentteja eikä laitteita, joihin sellainen on asennettu. Yhtiön, joka haluaa käyttää EAR:n alaista komponenttia, on tehtävä kauppaministeriölle pyyntö, jossa yhtiö sitoutuu noudattamaan rajoitusta. Komponentin tai laitteen saa kuitenkin muuten luovuttaa edelleen taholle, jota rajoitus ei koske.

ITAR perustuu lakiin aseviennistä (Arms Export Control Act), ja sitä valvoo ulkoministeriö eli U.S. Department of State. Yhtiön, joka haluaa myydä ITAR:n alaisen komponentin, on anottava ministeriöltä vientilupaa. Ostavan yhtiön on ilmoitettava, mihin käyttöön komponentti on tulossa. Lisäksi ostavan yhtiön on ilmoitettava valmistettavan laitteen loppukäyttäjä.

ITAR-komponentteja ei saa luovuttaa toiselle taholle tai edes käyttää samassa yhtiössä toiseen projektiin ilman ministeriön hyväksyntää. Tämän saaminen vastaa käytännössä uuden luvan hakemista. Lisäksi hallussa olevista komponenteista on tehtävä kuuden kuukauden välein raportti tai palautettava komponentit valmistajalle.

Vientirajoitukset kohdistuvat lentokelpoisten ja säteilysietoisten komponenttien lisäksi samalla prosessilla tuotettuihin komponentteihin, vaikka näitä myytäisiinkin kaupallisella mallinimellä. Tämä koskee myös komponentteja, joilla on lentokelpoista heikompi laatuluokka tai joille ei taata säteilyn sietoa. Valmistajan on annettava komponenttieroille sen testausta vastaava laatu- ja RHA-luokka.

Huhtikuuhun 2010 mennessä käytännöt rajoitusten soveltamisesta eivät olleet täysin vakiintuneet. Eri valmistajien komponentteihin suhtaudutaan eri tavoin. Yhtenä suuntauksena voi pitää, että vähintään 300 kRad:n TID:n sietävät komponentit ovat ITAR:n alaisia ja vähemmän sietävät ovat EAR:n alaisia. Toisaalta tämä koskee vain komponenttityyppejä, jotka normaalisti valmistusprosessinsa takia olisivat alttiita säteilylle.

#### **4.3.3. Toimitusajat ja hinnat**

Yleensä lentokelpoisten komponenttien toimitusajat ovat pitkiä, kymmeniä viikkoja tai jopa yli vuoden. Tavallisiin teollisuudessa käytettyihin komponentteihin verrattuna hinnat ovat kymmeniä tai jopa satoja kertoja suurempia.

Tilaukset ovat pieniä ja tuotanto on kallista, joten valmistajilla ei välttämättä ole komponentteja varastossa. Hankinnan aikatauluttamisessa täytyy varautua siihen, että komponenttieroaa aletaan valmistaa vasta tilauksen jälkeen. Tämä saattaa koskea myös teknisessä mallissa tai hyväksyntämallissa käytettäviä komponentteja, joskin niiden toimitusaika on yleensä lyhyempi.

Liitteessä 3 [54] on esitetty minimitalausmääriä, toimitusaikoja ja hintoja erityyppisille komponenteille. Kyseisiä komponentteja on käytetty MIXS/SIXS-instrumentin tietojenkäsittelyosassa. Lukuja tarkasteltaessa on huomioitava, että ne kuvaavat tilannetta yksittäisessä projektissa ja ne on tarkoitettu kuvaamaan eri mallien kustannusten eroa. Suuremmat tilaukset saattavat ohittaa pienet tilaukset toimitusajoissa. Vastaavasti valmistajalta tai jälleenmyyjältä saattaa löytyä aikaisempien erien jäämiä, jolloin toimitus voi olla välitön.

Komponenteille voidaan tehdä testejä, jotka eivät normaalisti kuulu kyseisen laatuluokan testaukseen. Yleensä on edullisempaa hankkia suoraan haluttua laatuluokkaa kuin tehdä alemmalle luokalle lisätestejä. Ylimääräisen testauksen kustannukset komponenttieroaa kohti saattavat olla kymmeniä tuhansia euroja.

#### **4.3.4. Suositeltavien osien listat**

Komponenttien hankinnan helpottamiseksi missiolla voi olla suositeltavien osien lista (PPL, engl. Preferred Parts List). PPL voi suositella käytettävän vain osaa avaruusjärjestöjen kelpuuttamista komponenteista. Näin tehdään varsinkin jos projektilla on keski-

tetty komponenttihankinta yhteisostojen mahdollistamiseksi. PPL voi sisältää myös komponentteja, jotka eivät ole lentokelpuutettuja. Tällaisen komponentin kelpuutusprosessi saattaa olla kesken, tai sen ominaisuudet ovat muuten tunnetut.

Keskitetyn komponenttihankinnan tarjontaa kannattaa hyödyntää, jos se on suunnittelun puitteissa mahdollista. Yhteisostoissa saavutetaan helpommin komponentin valmistajan vähimmäistilausmäärä. Lisäksi hankintaorganisaatio huolehtii kertaluonteisista kustannuksista, kuten mahdollisista lisätesteistä. Listan ulkopuolisten komponenttien, joille olisi vastine listalla, käyttö pitää yleensä perustella.

Missiokohtaisten PPL:ien lisäksi eri järjestöillä, tärkeimpinä ESA ja NASA, on omia listojaan. Listojen avulla pyritään yhtenäistämään käytettäviä komponentteja. Tämä vähentää kustannuksia ja parantaa laatua. Listoissa järjestöt pyrkivät suosimaan oman maanosansa teollisuuden komponentteja, mutta listoilla on myös komponentteja, joilla on toisen järjestön kelpuutusjärjestelmän mukainen kelpuutus.

ESCC 12300 [55] määrittelee periaatteet EPPL:lle (engl. European PPL), joka korvasi aikaisemman ESA PPL:n. EPPL:n käyttö eurooppalaisissa avaruusprojekteissa ei ole pakollista, mutta sen soveltamista suositellaan voimakkaasti standardissa ECSS-Q-ST-60 [17 s. 20]. Vastaavasti NASA:lla on osavalintalista NPSL (engl. NASA Parts Selection List).

Komponentin mukanaolo järjestöjen tai edes mission PPL:llä ei automaattisesti tarkoita, että komponentti kävisi kaikkiin mission laitteisiin tai soveltuisi muihin missioihin. Jokainen komponentti on hyväksyttävä asiakkaalla (ks. alaluku 4.1.4). Sekä EPPL:ssä että NSPL:ssä komponentit on jaettu kahteen luokkaan, josta luokka 1 sisältää lentokelpoisia, korkeimman laatuluokan komponentteja. Säteilyn sieto on silti huomioitava komponenttikohtaisesti.

#### 4.3.5. Kelpoisuusaika

Komponenttien mukana toimitetaan niiden valmistuserän tunnus ja valmistuspäivämäärä. Elektroniikkakortin valmistaja antaa komponenteille jäljitystunnuksen vastaanottaessaan ne varastoonsa. Mikäli toimituksessa on useamman valmistuserän komponentteja, annetaan kunkin erän komponenteille oma jäljitystunnus.

Jäljitystunnuksen avulla pystytään seuraamaan eräkohtaisen hyväksynnän (ks. alaluku 3.1.5) saaneita komponentteja ja komponenttien kelpoisuusaikaa. Lisäksi pystytään yksilöimään elektroniikkakortille asennetut komponentit (ks. alaluku 4.4.2). Mikäli eräkohtaisessa hyväksynnässä komponenteille on tehty lisätestejä, näillä on eri jäljitystunnus kuin saman erän testaamattomilla komponenteilla.

Komponentti voidaan asentaa piirilevylle kelpoisuusajan voimassaoloaikana. Asentamisen jälkeen kelpoisuusajan ohittamisella ei ole merkitystä. Kelpoisuusaika on seitsemän vuotta [56 s. 16] ja koskee vain lentomallissa käytettyjä komponentteja. Mikäli halutaan käyttää kelpoisuusaikansa ohittanutta komponenttia, tulee tälle tehdä kelpoisuusajan pidennys (engl. relifing).

Pidennyksessä todetaan komponentin toimintakelpoisuus testaamalla sen suorituskykyä. Muutamalle komponentille tehdään mahdollisesti destruktiivinen analyysi, jossa

niitä hiotaan kerroksittain ja tarkastellaan rakennetta. Kelpoisuusajan pidennys koskee kyseistä komponenttieroja ja pidentää kelpoisuusajan kokonaisuudessaan kymmeneen vuoteen.

#### 4.4. Valmistus ja testaus

Avaruuskäyttöön tarkoitettu elektronikkakortti tai -yksiköstä saatetaan yksinkertaisimmillaan valmistaa vain PFM ja varautua FS:n valmistamiseen hankkimalla piirilevy ja komponentit. Tyypillisessä mallifilosofiassakaan ei korttiyksilöitä ole kuin muutama. Teollisuuselektronikassa mittakaava on aivan toinen niin valmistuksessa kuin -testauksessa.

Kuten komponentit tai suunnittelun kulku, valmistus ja testaus pohjautuvat standardeihin ja määrittelyihin. Lisäksi työn suorittajilla tulee olla voimassa oleva sertifikaatti. Työvaiheista pidetään yksityiskohtaisesti kirjaa. Sähköisen suorituskyvyn testauksen lisäksi yksikölle tehdään myös ympäristötestejä. Kaikkia testejä ei tehdä kaikille malleille.

##### 4.4.1. Vaaditut hyväksynöt ja sertifikaatit

ECSS-Q-ST-70-sarjan standardit määrittelevät valmistuksessa käytettävät materiaalit, mekaaniset osat ja prosessit, jotka hyväksytetään asiakkaalla teknisissä listoissa. Näiden noudattamisen lisäksi valmistajalla tulee olla kaikilta osa-alueiltaan hyväksytty työprosessi ja työntekijöillä tulee olla voimassa oleva sertifikaatti:

- Tuotantoprosessi ja -linja täytyy hyväksyttää kokonaisuudessaan yleisesti. Tämän jälkeen valmistajalle voidaan myöntää hyväksyntöjä ja sertifikaatteja eri osa-alueille.
- Valmistuksen ja käsittelyn täytyy tapahtua hallituissa olosuhteissa, yleensä puhdastilassa. Valmistustilan ympäristöolosuhteita seurataan ja hyväksyttäminen uusitaan esimerkiksi suuren remontin jälkeen. Samoin seurataan komponenttien säilytystilan olosuhteita.
- Juotosmenetelmät täytyy hyväksyttää kullekin kotelomallille ja juotostavalle. Hyväksyttämistä on tarkemmin kuvattu alla.
- Asennuksen suorittajalla tulee olla asennusertifikaatti. Siihen vaaditaan koulutus, jonka pitää sertifikaatin myöntämiseen auktorisoitu taho. Sertifikaatti uusitaan määräajoin käymällä uusintaan auktorisoidun tahon pitämässä kertauskoulutuksessa.
- Asennuksen tarkastajalla tulee olla tarkastusertifikaatti. Se myönnetään ja uusitaan kuten yllä.

Juotosmenetelmien hyväksyttämisessä valmistetaan ensin elektronikkakortti käyttäen hyväksyttävää juotostapaa ja kotelomallia. Kortti altistetaan täristykselle ja lämpösyklilokeelle, joiden jälkeen juotosten täytyy edelleen täyttää vaatimukset. Mikäli



tähän ei pystytä, valmistaja voi anoa asiakkaalta projektikohtaista hyväksyntää komponentin käyttöön.

Lämpösyklikokeen syklien määrä vastaa tiettyä arvioitua räsitusastoa. Aina tämän tason saavuttaminen ei ole tarpeen. Projektikohtaisessa hyväksynnässä määritellään mission ympäristöolosuhteiden ja elektroniikkakortin suunnitellun käytön perusteella, mikä syklien määrä vastaa elektroniikkakortin räsitusastoa. Mikäli tämä saavutetaan, voi asiakas myöntää projektikohtaisen hyväksynnän komponentin asennukselle. Koetta ei tarvitse toistaa joka projektissa, vaan hyväksyntää voi anoa aikaisemmin suoritettun kokeen perusteella.

#### **4.4.2. Tarkastukset ja jäljitettävyyden**

Valmistus jakautuu vaiheisiin, kuten käsin ladottavien komponenttien juottaminen tai kortin puhdistus. Tiettyjen vaiheiden jälkeen tehdään tarkastuksia. Osassa niistä tarkastetaan työn laadun lisäksi valmistusdokumentaatio.

Työn laatuun liittyviä tarkastuksia ovat esimerkiksi juotostarkastukset ja polaaristen komponenttien tarkastus, jossa tarkastetaan komponenttien asento. Tarkastuksen suorittajalla tulee olla asennusertifikaatti eikä hän voi tarkastaa omia asennuksiaan. Suoritettujen työn vaiheet ja tarkastukset sekä suorittaja kirjataan valmistusdokumentaatioon.

Tiettyissä vaiheissa tarkastetaan myös valmistusdokumentaatio, jonka tarkastajalla tulee olla tarkastusertifikaatti. Tämä tehdään yleensä silloin, kun seuraava vaihe tulee merkittävästi vaikeuttamaan tarkastusten tekemistä tai testaamista. Tällainen kohta on esimerkiksi ennen moduulin eli kortin ja sen tukimekaniikan lakkaamista. Osa näistä tarkastuksista on pakollisia (MIP, engl. Mandatory Inspection Point) ja niihin osallistuu asiakkaan edustaja.

Valmistusdokumentaatioon kirjataan jokaisen komponentin jäljitystunnus (ks. luku 4.3.3) ja asennusmateriaali, kuten juotostina tai liima. Myös työkalut ovat yksilöityjä ja kirjataan valmistusdokumentaatioon. Mikäli esim. komponenttierästä julkaistaan varoitus tai momenttiavain ei läpäise kalibrointia, oikeat komponentit voidaan vaihtaa tai kiinnitysruuvit tarkastaa.

#### **4.4.3. Käsitteleminen**

Valmistuksessa ja testauksessa elektroniikkakorttia on käsiteltävä varoen. Käsitteleminen ei saa jättää korttiin jälkiä tai vahingoittaa juotoksia. Suunnittelussa on huomioitava testauksen edellyttämät testipisteet ja -liittynät. Mikäli varotoimista huolimatta kortti altistuu esimerkiksi ylijännitteelle tai epäpuhtauksille, valmistajan tulee tehdä poikkeamaraportti.

Elektroniikkakortin liittynät on huomioitava testilaitteistoa suunniteltaessa ja testauksessa. Lentokelpoisiin liittimiin saa kytkeytyä vain toisilla lentokelpoisilla liittimillä. Lisäksi liittimille on määritelty kytkentäkertojen enimmäismäärä ja kytkemisistä ja irrottamisista pidetään kirjaa. Vastaavasti pidetään kirjaa esimerkiksi ohjelmoitavien

muistien kirjoituskerroista. Yleensä kortin valmistajalle on budjetoitu vain osa käytettävistä kytkentäkerroista ja niiden säästämiseksi käytetään liitinsuojia (engl. saver), joiden toiselle puolelle testilaitteisto kytketään.

Tehdyt korjaukset ja muutokset kirjataan valmistusdokumentaatioon vastaavasti kuin suunnitellut asennukset. Korjauksia ei voi tehdä rajattomasti, sillä yksittäinen juotos voidaan uusida vain tietyn määrän kertoja. Samoin yksittäiset testauksessa tarvittavat piikit tai vastaavat yleensä mieluummin jätetään kortille kuin rasietaan korttia irrottamisella.

#### 4.4.4. Virittäminen ja testaus

Elektroniikkakortti ja sen mekaaninen tukirakenne muodostavat moduulin. Elektroniikkayksikkö koostuu omasta tukirakenteestaan ja moduuleista. Kokoonpanon ja tarkastusten jälkeen moduulille tehdään sähköisiä testejä. Testeillä todennetaan komponenttien toimintakunto ja moduulin suorituskyky. Suorituskykytestien hyväksyntärajat perustuvat suorituskykyanalyysiin, jossa suorituskykyä on analysoitu myös ilman ikääntymisen vaikutusta.

Avaruuselektroniikalle, etenkin analogiaelektroniikalle, tyypillinen osa moduulitestauksista on virittäminen. Käytännön suoritusarvot eroavat laskennallisista komponenttien yksilökohtaisten erojen takia. Korttiyksilöiden pienestä määrästä johtuen tätä voidaan hallita virityskomponenttien avulla. Virityskomponentit ovat passiivikomponentteja, tyypillisimmin vastuksia.

Suunnittelussa kytkentään jätetään paikat virityskomponenteille. Kytkentää testataan ja virityskomponentiksi asennetaan sopivan arvoinen komponentti. Viritysvastuksen sopiva arvo etsitään yleensä säätövastusta käyttäen ja tämän jälkeen paikkaan juotetaan kiinteäarvoinen vastus.

Kokoonpanon jälkeen yksikön ulkomitat, massa, massakeskipiste ja inertiamomentti mitataan. Niiden täytyy vastata mekaniikka-analyysiä, jotta analyysin tulokset ovat luotettavia. Tietoja käytetään järjestelmän vastaavien arvojen laskemiseen, jotta esimerkiksi satelliitin lentoratakorjaukset onnistuvat luotettavasti [3 s. 25]. Sähköisten testien jälkeen yksikölle tehdään ympäristötestit, joita on kuvattu seuraavassa alaluvussa.

Yleensä sopimus määrittelee, että testausvalmius on ylläpidettävä laukaisuun asti. Laukaisu saattaa tapahtua vasta vuosia yksikön luovutuksen jälkeen. Tämä täytyy huomioida testilaitteiston suunnittelussa ja käytössä. Myös testilaitteiston konfiguraatio on hallittava, jotta tarvittaessa yksikön testit voidaan toistaa samanlaisina. Sopimuksessa saatetaankin määritellä, että testilaitteisto kuuluu toimitukseen ja luovutetaan yksikön mukana.

#### 4.4.5. Ympäristötestit

Ympäristötesteillä todennetaan yksikön toiminta ääriolosuhteissa ja rasitukselle altistumisen jälkeen. Tyypilliset yksikölle tehtävät testit ovat värinätesti, shokkitesti, lämpö-

alipainetestit, lämpösyklitestit ja EMC-testit. Ne suoritetaan yleensä tässä järjestyksessä. [3 s. 39.]

Ympäristötestit tehdään joko kelpuutustasoisena tai hyväksyntätasoisena. Kelpuutustasoisessa testissä rasitus on tietyn marginaalin verran suurempi kuin mission oletettu maksimirasitus. Marginaali varmistaa, että testijärjestelmän toleransseista huolimatta testin todellinen rasitus on vähintään oletetun maksimirasituksen suuruinen. Hyväksyntätasoisessa testissä rasitus, testijärjestelmän toleranssit huomioiden, ei saa ylittää mission oletettua maksimirasitusta. [57 s. 24-26.]

Mallifilosofia määrää testien tason, joka vaikuttaa testin rasitusarvoihin ja keston. QM tai EQM testataan kelpuutustasoisesti ja FM hyväksyntätasoisesti. Mikäli valmistetaan PFM, se testataan kelpuutustasoisella rasituksella, mutta testien kesto on hyväksyntätason mukainen.

Ennen ympäristötestikampanjaa yksikölle tehdään täydelliset sähköiset toiminnalliset testit ja suorituskyykytestit. Testien välissä yksikölle tehdään toiminnallisia testejä ja suorituskyykytestejä. Myös testien aikana yksikön toimintakykyä testataan soveltuvien osien. Kaikkien ympäristötestien jälkeen yksikölle tehdään taas täydelliset toiminnalliset testit ja suorituskyykytestit.

Tärinätestissä yksikkö kiinnitetään alustaan, jota täräytetään eri taajuuksilla ja voimakkuuksilla. Tärinää aiheutetaan jokaisen akselin suuntaisesti. Shokkitestissä yksikön kiinnitysalustaan isketään halutulla voimakkuudella. Iskut annetaan vuorollaan jokaisen akselin suuntaisesti.

Lämpö-alipainetestissä yksikkö on kammiossa, jossa paine on korkeintaan  $10^{-3}$  Pa [57 s. 64]. Yksikölle tehdään suorituskyykytestit maksimi- ja minimilämpötiloissa. Yksikköön kiinnitetyillä lämpöantureilla mitataan lämmön johtumista rakenteissa. Lämpösyklitestit voidaan tehdä lämpö-alipainetestin yhteydessä tai erikseen. Siinä kammion lämpötilaa vaihdetaan syklisesti. Testi todentaa erityisesti mekaanisen rasituksen kestoa. Ensimmäisen ja viimeisen syklin aikana tehdään toiminnalliset testit.

EMC-testissä mitataan yksikön aiheuttamia sähkömagneettisia häiriöitä ja testataan, miten yksikkö sietää niitä. Testaus tehdään säteilevien ja johtuvien häiriöiden suhteen. Lisäksi testataan yksikön ESD:n sieto.

## 5. KIRJASTON MÄÄRITTELY

Kirjaston toteutusta pohdittiin työryhmässä, jonka jäsenet olivat elektroniikkasuunnittelijoita, järjestelmäsuunnittelijoita tai osallisina tarjousten laatimisessa. Määrittelyn edetessä työryhmä kommentoi osa-alueita ja antoi ehdotuksia niin yksityiskohtiin kuin koko kirjaston käyttöajatukseen.

Olemassa olevan informaation ja suunnitellun käytön perusteella valitaan halutut ominaisuudet. Kirjaston rakenne ja toteutustapa muotoutuvat näiden perusteella. Kirjaston käyttöön liittyville henkilöille määritellään roolit ja tehtävät, jotta kirjasto saadaan osaksi jokapäiväistä toimintaa.

### 5.1. Lähtötilanne

Kirjaston tulee hyödyntää olemassa olevia järjestelmiä, ohjelmistoja ja informaatiota. Suunnittelun kannalta merkityksellisin on tuotetiedon hallintajärjestelmä eli PDM-järjestelmä (engl. Product Data Management). Komponenttien kannalta merkityksellisiä ovat myös yrityksen toiminnanohjaus- eli ERP-järjestelmä (engl. Enterprise Resource Planning) ja suunnitteluohjelmiston komponenttikirjasto.

Kirjaston käyttäjiksi oletetaan yksikön elektroniikkasuunnittelijat ja järjestelmäinsinöörit. Järjestelmäinsinöörit ovat vanhempia suunnittelijoita, jotka ohjaavat suunnitteluprojektin muiden suunnittelijoiden toimintaa. Heillä on yleensä kokemusta elektroniikka- tai digitaalisuunnittelusta ja he myös tekevät tarjouslaskennan aikaista esisuunnittelua.

#### 5.1.1. Aikaisempi suunnittelu

Yksikössä tehty kytkentä- ja piirilevy-suunnittelu sekä muu dokumentaatio on pääsääntöisesti tallennettu PDM-järjestelmään. Vanhimmat suunnittelut on tallennettu vain paperimuotoiseen projektiarkistoon. Tämä ei muodostune ongelmaksi, sillä pilottifunktioiksi pyritään ottamaan mahdollisimman tuoreita versioita funktioista.

Analyysit, suunnitteludokumentit ja muu dokumentaatio on tehty toimisto-ohjelmistoilla. Yksikön käytössä olleet toimisto-ohjelmistot ovat pitkälti saman tuoteperheen eri versioita. Nykyinen toimisto-ohjelmisto pystyy pääsääntöisesti hyvin lukemaan aikaisemmillä versioilla tehtyjä dokumentteja.

Kytkenä- ja piirilevy-suunnittelua sen sijaan on vuosikymmenien aikana tehty erilaisilla ohjelmistoilla. Tietyn ohjelmiston käyttöaikana on voitu käyttää myös useampaa kuin yhtä komponenttikirjastoa. Osa ohjelmistoista ei ole enää käytettävissä. Aikaisemmissa komponenttikirjastoissa on komponenttiin liitettyä tietoa vähemmän tai se voi

olla vanhentunutta tai virheellistä. Varsinkaan vanhimpia suunnitteluja ei voida käsitellä suoraan sähköisessä muodossa.

Tarvittaessa kytkentä voidaan piirtää uudelleen nykyisillä suunnitteluohjelmistoilla ja niiden komponenttikirjastoilla. Samoin analyysieihin tai muihin paperimuotoisen projektiarkiston dokumentteihin voidaan viitata tarvittaessa. Tarve oletetaan epätodennäköiseksi.

Jokainen osa tai komponentti on kirjattu nimikkeeksi ERP-järjestelmään. Jokaisella nimikkeellä on yksilöllinen osanumero eli nimikekoodi. Yhdellä komponenttimallilla voi olla useampi nimikekoodi, sillä komponentin valmistaja ilmaistaa nimikkeen kuvauksessa. Vanhimilla nimikkeillä näin ei ole tehty, mutta silloinkin nimikkeen kuvaus sisältää tarkan yksilöinnin viitaten komponenttistandardeihin.

Osanumeron lisäksi komponenteilla on jäljitystunnus. Jäljitystunnuksella ei ole merkitystä kirjaston kannalta. Jäljitystunnus ei yleensä edes ilmene suunnitteludokumentaatioissa vaan vain valmistusdokumentaatioissa. Kirjastossa on kuitenkin huomiotava, jos funktiossa käytetylle komponentille on tehty ylimääräisiä testejä.

### 5.1.2. Käyttäjät ja tietotekniikkaympäristö

Käyttäjien työasemiin on asennettu yrityksen vakio-ohjelmistot. Kirjaston kannalta merkityksellisiä näistä ovat käyttöliittymäohjelmistot PDM- ja ERP-järjestelmiin sekä toimisto-ohjelmistot. Tarvittavia suunnitteluohjelmistoja työasemiin ovat asentaneet suunnittelijat itse tai kyseisen ohjelmiston pääkäyttäjät. Näistä merkityksellisin on kytkentä- ja piirilevy-suunnitteluohjelmisto, jonka pääkäyttäjät vastaavat myös komponenttikirjastojen ylläpitämisestä. Lisäksi pääkäyttäjät luovat ja ylläpitävät komentosarjoja (engl. script). Komentosarjalla esimerkiksi luodaan PDM-järjestelmään syötettävä osaluettelo.

Yrityksen sisäverkon verkkoasemilla ovat esimerkiksi yksikön standardikirjasto ja projektikohtaiset hakemistot. Projektihakemistoa käytetään muiden kuin toimisto-ohjelmistojen työnaikaisten tiedostojen säilyttämiseen. Tällaisia ovat esimerkiksi suunnitteluohjelmistojen tiedostot ja analyysien aputiedostot. Nämä siirretään PDM-järjestelmään vasta kun dokumentti revisioidaan. Revisio tehdään, kun dokumentti on valmis tai siitä halutaan tallettaa yksiselitteinen väliversion, esimerkiksi asiakkaalle toimitettavaksi.

Verkkoasemien hakemistojen käyttöoikeudet ovat käyttäjä- ja hakemistokohtaisia. Osa hakemistoista on kaikkien yrityksen työntekijöiden käytettävissä, osa on rajattu yksikön työntekijöihin tai yksittäisen projektin työntekijöille. PDM-järjestelmässä kullekin dokumentille on määritelty käyttäjäryhmä, johon kuuluvat pystyvät käsittelemään dokumenttia. Työntekijä voi kuulua useaan käyttäjäryhmään.

Pääsääntöisesti yksikön työntekijöillä on käyttöoikeus kaikkiin yksikön suunnittelu- ja projektien projektihakemistoihin ja dokumentteihin PDM-järjestelmässä. Myös kirjasto tulee olemaan kaikkien yksikön työntekijöiden käytettävissä. Nämä seikat yksinkertaisesti kirjaavat kirjaston vaatimaa tietoturvaa.

## 5.2. Ominaisuuksia ja toteutusvaihtoehtoja

Kirjaston tulee olla käytettävä ja ylläpidettävä. Mikäli kirjaston käyttö on hankalaa, sitä ei käytetä. Samoin kirjastoa ei ylläpidetä, mikäli sen sisältämän informaation lisääminen tai päivittäminen on hankalaa tai aikaavievää.

Kirjaston käyttäjät ovat oletusarvoisesti kokeneita tietokoneen käyttäjiä, jotka osaavat käyttää useita eri ohjelmistoja. Kirjaston käyttö ei kuitenkaan tule olemaan päivittäistä, joten käyttöliittymä ei saisi vaatia erityistoimenpiteiden tai -komentojen muistamista. Informaatio kirjastoon tulisi tuottaa samoilla ohjelmistoilla, joilla suunnittelu tehdään, jotta työn määrä olisi mahdollisimman pieni.

### 5.2.1. Tuotettavat dokumentit

Funktion kuvaava informaatio talletetaan yhteen dokumenttiin, jota kutsutaan funktion datalehdeksi. Datalehtien sisältö voi päivittyä, joten kullakin datalehdellä on oltava jonkinlainen versionhallinta. Lisäksi datalehtien muuttaminen vahingossa tulee estää. Muutokset datalehtiin ja uusien datalehtien lisääminen kirjastoon tehdään kirjaston ylläpitäjän myötävaikutuksella. Datalehti tuotetaan tekstinkäsittelyohjelmalla.

Funktion datalehti sisältää funktion kytkennän ja yksityiskohtaista tietoa funktiosta. Tarvittaessa viitataan projektikohtaiseen dokumentaatioon. Datalehden liitteenä on laajennettu osaluettelo. Laajennettu osaluettelo sisältää komponenttien mallin ja lukumäärän lisäksi kirjaston kannalta olennaista tietoa komponenteista. Tietoja voidaan vielä tarkentaa datalehdessä.

Datalehtien lisäksi kirjasto tarvitsee käyttöliittymän, jonka avulla käyttäjä pystyy valitsemaan kiinnostavat funktiot tarkasteltavaksi. Käyttöliittymässä funktiot jaotellaan tyypeittäin ja niistä esitetään tärkeimmät tiedot. Datalehden aukaiseminen käyttöliittymän kautta on suotava ominaisuus. Käyttöliittymä toteutetaan taulukkolaskentaohjelmiston dokumenttina.

Funktiolistaus on yksi kirjaston määrittelyn lähtötiedoista. Se sisältää lukumäärät ja tyypit osaston projekteissa käytetyistä funktioista. Listaus liitetään kirjastoon ja sitä ylläpidetään osana kirjastoa. Listauksesta saadaan historiatietoa osaston projekteista.

Datalehtien pohjat ovat funktiotyypikohtaisia. Kullakin funktiotyypillä on omat kriittiset suunnitteluparametrinsa. Kun kirjastoon päätetään lisätä uusi funktio, pohjaa aletaan täyttää suunnittelun edistyessä. Pohjaan sisällytetään täyttöohjeita.

Ylläpito-ohje sisältää kirjaston rakenteen kuvauksen. Ohje käsittelee funktioiden lisäämistä ja päivittämistä kirjastossa sekä ohjeita kirjaston yhtenäisen ulkoasun säilyttämiseksi.

### 5.2.2. Toteutusvaihtoehdot

Kirjastotyöryhmässä pohdittiin kolmea toteutusvaihtoehtoa: erillinen tietokanta, hake-mistorakenne verkkoasemalla ja kirjasto PDM-järjestelmässä. Erillinen tietokanta, jolla on kirjastoa varten räätälöity käyttöliittymä, mahdollistaa eniten ominaisuuksia. Yksi-

kössä on käytössä tällainen kanta, jolla seurataan poikkeamia ja niiden aiheuttamia toimenpiteitä. Hakemistorakenne verkkoasemalla, kuten yksikön standardikirjasto, on yksinkertainen käyttää. PDM-järjestelmä tarjoaa haku- ja versiointitoimintoja.

Erillinen tietokanta vaatii ylläpitäjältä osaamista, jota ei ole useimmilla yksikön työntekijöistä. Lisäksi tietokannan luominen vaatii vielä syvempää tietokantaohjelmiston hallintaa. Tietokantaohjelmisto kuuluu työasemien vakio-ohjelmistoihin, joten käyttäjälle tietokanta ei aiheuttaisi mitään ylimääräistä työtä.

Hakemistorakenne vaatii käyttöliittymän tai sisällysluettelon, jotta käyttäjä pystyy valitsemaan funktioita tarkasteltavaksi. Hakemistorakenteen ja käyttöliittymän ylläpito sekä varsinkin datalehtien versiointi vaatii ylläpitäjältä käsityötä. Toisaalta yksinkertainen rakenne on riittävän ohjeistuksen avulla kenen tahansa yksikön työntekijöistä ylläpidettävissä.

PDM-järjestelmässä etenkin dokumenttien versiointi on valmiiksi toteutettu ominaisuus. Yksikön työntekijät käyttävät järjestelmää päivittäin, joten siihen pohjautuva kirjasto ei vaadi uusien ominaisuuksien opettelemista. PDM-järjestelmän huono puoli on se, että hakutoiminnot ja dokumenttien linkitys toisiinsa eivät suoraan sovellu kirjaston käyttöön.

Kirjaston pilottivaiheessa datalehtiin tuleva informaatio kerätään verkkoaseman hakemistorakenteeksi. Tässä vaiheessa ei vielä tarvita hallittua versiointia ja vain työryhmän jäsenet käsittelevät informaatiota, joka saattaa muuttua usein. Tällöin hakemistorakenne on PDM-järjestelmää nopeampi ja yksinkertaisempi käyttää.

Kirjaston muodoksi valittiin ensin hakemistorakenteen ja PDM-järjestelmän yhdistelmä. Mallissa datalehdet sijoitettaisiin PDM-järjestelmään, mutta niiden vertailua varten luotaisiin käyttöliittymädokumentti verkkoasemalle. Malli oli yksinkertainen ja hyödynsi olemassa olevia järjestelmiä, mutta käyttöliittymästä ei olisi suoraan pystynyt aukaisemaan datalehtiä.

Joulukuussa 2009 PDM-järjestelmä päivitettiin uudempaan versioon. Yksi uusista ominaisuuksista on mahdollisuus viitata dokumentin tietueeseen hyperlinkin avulla. Tämän johdosta myös käyttöliittymädokumentti tullaan sijoittamaan PDM-järjestelmään. Käyttöliittymädokumentista tehdään revisio, kun kirjastoon lisätään datalehti tai olemassa oleva päivitetään uuteen versioon.

### **5.3. Kirjaston rakenne PDM-järjestelmässä**

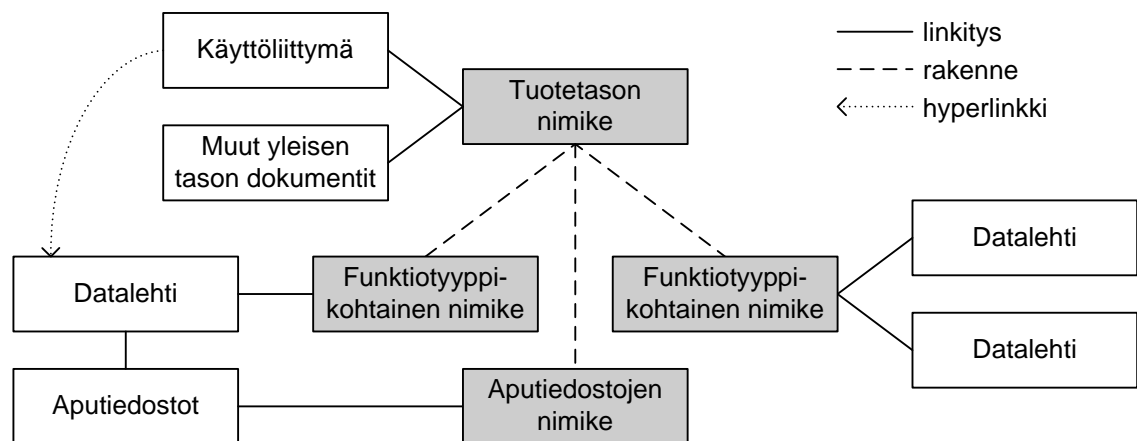
PDM-järjestelmän oleelliset osat kirjaston kannalta ovat dokumenttimoduuli ja nimikemoduuli. Dokumenttimoduulissa dokumenteille luodaan tietue, jolla on yksilöllinen dokumenttinumero. Nimikemoduulissa nimikkeen tietueella on vastaavasti yksilöllinen nimiketikoodi. Dokumentteja ja nimikkeitä voidaan linkittää toisiinsa.

Itse dokumenttitiedosto tallennetaan järjestelmässä tietueen yhteyteen. Dokumenttien versiointi ja hyväksyntäkierto toteutetaan järjestelmässä ja kirjataan myös tiedostoon. Käyttäjä ei pysty muuttamaan hyväksyttyä dokumenttia, vaan dokumentti on revisioitava. Tekstinkäsittely- ja taulukkolaskentaohjelmistoilla tehtyjä dokumentteja

voidaan editoida suoraan järjestelmästä ilman, että niitä tarvitsee siirtää käyttäjän työasemalle.

Nimikkeet voivat olla yksittäisiä osia tai sisältää rakenteen. Esimerkiksi elektroniikkakortti on puolivalmiste, jonka rakenne sisältää komponentteja. Vastaavasti tuotteen rakenne sisältää elektroniikkakortteja. Nimike ei välttämättä ole konkreettinen esine, vaan nimike voidaan luoda myös yhdistämään tiettyä joukkoa dokumentteja, jotka linkitetään siihen. Tällainen nimike voidaan luoda esimerkiksi katselmoitavalle dokumenttipaketille.

Kirjastoa varten luodaan tuotetason nimike, oma nimike jokaiselle funktiotyypille ja aputiedostojen nimike. Funktiotyyppejä ovat esimerkiksi virtaraja tai transistorikytkin. Tyypikohtaiset nimikkeet ja aputiedostojen nimike sijoitetaan tuotetason nimikkeen rakenteeseen. Funktioiden datalehdet liitetään tyyppinsä mukaiseen nimikkeeseen. Käyttöliittymädokumentti, ohjeistus ja muut yleisen tason dokumentit liitetään tuotetason nimikkeeseen. Dokumenttien ja nimikkeiden rakenne on esitetty kuvassa 5.



**Kuva 5.** Kirjaston rakenne PDM-järjestelmässä.

Datalehteä luotaessa käytetyt tiedostot kootaan yhteen ja talletetaan järjestelmään. Aputiedostot liitetään datalehteen ja aputiedostojen yhteiseen nimikkeeseen. Tällaisia tiedostoja ovat ainakin kytkentäsuunnitteluohjelman tiedosto kytkennästä, mahdolliset muut piirustukset ja alkuperäinen osaluettelotaulukko. Mikäli datalehteä päivitetään, aputiedostot ovat näin saatavissa alkuperäisessä muodossaan, mikä helpottaa muokkausta.

Tuoterakenteen avulla kirjastoon liittyvistä dokumenteista saadaan kootusti tietoa. PDM-järjestelmässä voidaan esimerkiksi ajaa raportti, joka kuvaa kunkin dokumentin voimassaolevan version. Kirjastoon kuuluvan materiaalin hallinta on näin yhtenevää projektien dokumentointikäytännön kanssa.



## 5.4. Kirjaston käyttö

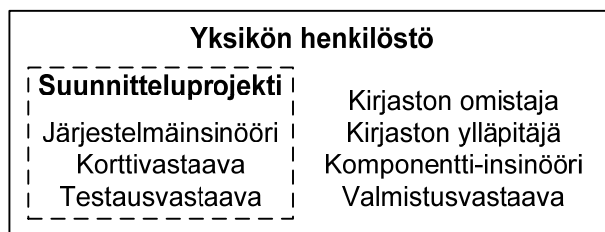
Kirjasto on informaatiovarasto, eikä sen hyödyntämistä ole tarpeen määritellä yksityiskohtaisesti. Sen sijaan uusien funktioiden lisääminen kirjastoon tulee saada osaksi yksikön normaalia toimintaa. Muuten kirjasto jää irralliseksi osaksi, jota pilottivaiheen jälkeen päivitetään harvoin tai ei lainkaan.

Jokaista projektissa suunniteltua funktiota ei ole järkevää tallettaa kirjastoon. Päätös funktion tallettamisesta kirjastoon on tehtävä ajoissa, jotta datalehteä voidaan täyttää suunnittelun edetessä. Projektin loppuvaiheessa datalehden täyttäminen alusta voisi jäädä tekemättä, mikäli suunnittelija on välittömästi resursoitu seuraaviin tehtäviin tai aikataulussa on jääty jälkeen.

Kirjaston käyttö ja laajentaminen suunnitteluprosessin osana on tärkeää myös siksi, että näin niihin varataan resursseja. Datalehden täyttö näkyy aikatauluissa ja kustannukset osataan kohdentaa yksikön kehittämistyöhön eikä suunnitteluprojektille.

### 5.4.1. Työntekijöiden roolit

Yksikön henkilöstö työskentelee suunnitteluprojekteissa tai yksikön tuki- ja esimiestehtävissä. Henkilöstön roolit kirjaston kannalta on esitetty kuvassa 6. Tavallisten työtehtävien lisäksi määritellään alla kirjaston omistajan ja ylläpitäjän roolit.



**Kuva 6.** Kirjastoon liittyvät roolit yksikössä.

Kirjaston omistajaksi valitaan henkilö, jolla on laaja tietämys yksikössä parhaillaan tehtävästä suunnittelusta. Lisäksi hänellä tulee olla tietoa lähestyvistä tarjouspyynnöistä ja niissä oletettavasti tarvittavista funktioista. Täten kirjaston omistajalla on näkemys siitä, minkälaisia funktioita kirjastoon on tarpeen lisätä. Kirjaston omistajaksi sopivia henkilöitä ovat yksikön kehityspäällikkö tai projektipäälliköiden ja järjestelmäinsinöörien esimies.

Kirjaston omistaja valitsee yhdessä projektin järjestelmäinsinöörin kanssa, mistä toteutettavasta funktiosta tehdään kirjastoon datalehti. Järjestelmäinsinööri ohjaa korttivastaavaa, joka tekee käytännön työn datalehden täyttämisessä. Järjestelmäinsinööri myös tarkastaa datalehden asiasisällön.

Korttivastaava on yleensä elektroniikkakortin kytkennän suunnittelija. Suunnittelu- projektissa korttivastaava valvoo piirilevysuunnittelua sekä kortin kokoonpanoa ja testausta. Korttivastaava täyttää datalehteä suunnittelun edetessä. Valmistusvastaavan,

testausvastaavan tai komponentti-insinöörin osaamisalaan liittyviin kohtiin korttivastaava hakee näiltä tarvittavat tiedot.

Valmistusvastaava vastaa elektroniikkakorttien ja -yksiköiden kokoonpanosta. Hän kommentoi tarvittaessa, mikäli datalehden funktiossa on komponentteja, joiden asentaminen on hankalaa tai aikaavievää. Vastaavasti testausvastaava kommentoi funktion testaamiseen tarvittavaa laitteistoa ja arvioi työmäärää.

Komponentti-insinööri vastaa komponenttien hankinnasta. Komponentti-insinööri hallinnoi tietokantaa, jossa on kaupallista tietoa komponenteista. Tietokannassa on myös esimerkiksi komponenttien massa- ja pinta-alatietoja. Vanhemmilla suunnitteluohjelmilla tai komponenttikirjastoilla tehdyissä suunnitteluissa, joissa näitä tietoja ei ole komponentin attribuutteina, tieto saadaan tietokannasta.

Kirjaston ylläpitäjä lisää funktion datalehden kirjastoon ja päivittää käyttöliittymää. Ylläpitäjä myös neuvoo kirjaston käyttäjiä ja tarvittaessa päivittää ohjeistusta tai luo uusia datalehtien pohjia. Oletettavasti yksi yksikön elektroniikkasuunnittelijoista tai järjestelmäinsinööreistä valitaan ylläpitämään kirjastoa omien tehtäviensä ohella.

#### **5.4.2. Yhdistäminen suunnittelun vaiheisiin**

Alaluvussa 4.1.2 esitellyt PDR, CDR, MRR, TRR ja TRB ovat katselmointeja, jotka asiakas suorittaa projektin dokumentaatiolle. Ne eivät suoraan ole sopivia kiinnekohtia sisäiseen käyttöön tarkoitetun kirjaston kannalta. Ne ovat kuitenkin jokaisessa projektissa, joten datalehden täyttäminen on järkevää jaksottaa niihin sitoen. Kaavio datalehden täyttämisestä on esitetty liitteessä 5.

Elektroniikkakortista toteutetaan lentomallia edeltäviä malleja mallifilosofian mukaisesti. Niiden kytkentä ja dokumentointi katselmoidaan yksikössä sisäisesti. Kirjaston omistaja neuvottelee järjestelmäinsinöörin kanssa ja päättää ensimmäisen mallin kytkennän katselmointiin mennessä, tehdäänkö jostakin funktiosta datalehti. Järjestelmäinsinööri ohjeistaa korttivastaavaa luomaan datalehden PDM-järjestelmään. Näin korttivastaava tietää suunnittelun edetessä kirjata esiin tulevia seikkoja datalehteen.

Yksityiskohtaisessa määrittelyvaiheessa tehdyt analyysit saattavat muuttaa kytkentää tai sen komponenttien arvoja. Piirilevysuunnittelu ja teknisen mallin valmistaminen saattavat myös nostaa esiin huomioitavia asioita. Korttivastaavan ei ole tarpeen kopioida kaikkea datalehteen, vaan datalehdessä voidaan ja on suotavaa viitata projektin tuottamaan dokumentaatioon.

Korttivastaava täyttää datalehdestä kytkentää ja analyysijä koskevat osat lentomallin MRR:ään mennessä. Korttivastaava täyttää komponentteja ja valmistusta koskevat osat TRR:ään mennessä. Lopulta korttivastaava täyttää testausta ja viritystä koskevat osat TRB:hen mennessä ja tekee mahdolliset päivitykset aikaisempiin osiin. Järjestelmäinsinööri tarkastaa datalehden asiasisällön ennen katselmointeja ja lopulta merkitsee PDM-järjestelmässä datalehden tarkastetuksi.

Kirjaston ylläpitäjä opastaa korttivastaavaa tarvittaessa. Datalehden valmistuttua ylläpitäjä päivittää käyttöliittymän datalehden perusteella. Kirjaston omistaja merkitsee datalehden ja revisioidun käyttöliittymädokumentin PDM-järjestelmässä hyväksytyiksi.

## 5.5. Tallennettavat tiedot

Datalehdessä on kaikille funktiotyypeille yhteistä tietoa, kuten komponentit, ja yhteisiä otsikoita, kuten testauksessa huomioitavat asiat. Kullekin funktiotyypille määritellään lisäksi kriittiset suunnitteluparametrit. Datalehden otsikkorakenne on esitetty liitteessä 4. Tässä alaluvussa eriteltyjen asioiden lisäksi datalehdessä on vapaasti käytettävä tila kokemuksille funktiosta ja projekteista, joissa sitä on käytetty.

Osa datalehden tiedoista kopioidaan suoraan käyttöliittymään. Käyttöliittymässä näytetään komponenttien kokonaishinta ja -massa sekä muut osaluettelosta yhteenlasketut arvot. Lisäksi näytetään kriittiset parametrit. Mikäli komponentteihin tai valmistukseen liittyy huomioitavaa, on näistä käyttöliittymässä merkintä. Näin kirjaston käyttäjä voi esimerkiksi välttää funktioita, joissa on käytetty ITAR:n alaisia komponentteja.

### 5.5.1. Kytkentäsuunnittelu ja kriittiset suunnitteluparametrit

Funktion kytkentäkaavio tallennetaan datalehteen kuvana. Tällöin käyttäjä ei voi kopioida kytkentäkaaviota suoraan omaan suunnitteluunsa, vaan kytkentä on piirrettävä kulloinkin käytettävän komponenttikirjaston komponenteilla. Kuvan on oltava riittävän selkeä ja yksiselitteinen.

Datalehdessä on myös alaluku, jossa kytkentä perustellaan. Alaluvussa kuvataan mahdollisia erityisolosuhteita, jotka ovat vaikuttaneet kytkennän toteutukseen tai komponenttivalintoihin. Lisäksi datalehdessä eritellään funktion kriittiset suunnitteluparametrit. Ne esitetään käyttöliittymässä, mikäli ne voidaan ilmaista numeerisesti.

Kriittiset parametrit ovat funktiotyypikohtaisia. Niiden perusteella kirjaston käyttäjä pystyy valitsemaan tai sulkemaan pois kiinnostavat datalehdet. Esimerkiksi virtarajafunktiolla kriittisiä parametreja voisivat olla katkaisuvirta, tehon sieto ja pulssiteho vikatilanteessa. Vastaavasti tiedonsiirtofunktiolla niitä voisivat olla nopeus ja puskuripiirien käyttöjännite sekä tehonkulutus.

Säteilyn sieto on merkittävää kaikelle avaruuselektronikalle. Datalehdessä on oma kohtansa siihen liittyviin huomioihin. Mikäli funktion tärkeimmät komponentit ovat alttiita kokonaisannokselle tai tilamuutoksille, näiden säteilyn sieto tulee yhdeksi kriittiseksi parametriksi.

Kirjaston funktiot ovat lähtökohtaisesti lentomalliin tarkoitettuja kytkentöjä. Datalehteen kuitenkin merkitään, mitkä mallit kyseisestä funktiosta on toteutettu, ja näiden dokumentteihin annetaan viittaukset. Näin datalehden kautta voi saada hyödyllistä tietoa myös aikaisempia malleja suunniteltaessa.

Kun datalehteä myöhemmin hyödynnetään, uusi suunnittelu ei todennäköisesti ole täysin yhtenevä datalehden kanssa. Pieniä muutoksia kutsutaan funktion varianteiksi ja

niille on oma osansa datalehdessä. Variantteja olisivat esimerkiksi suorituskyvyn muuttaminen komponenttien mitoitusvaihtamalla tai poikkeava asennustapa.

### 5.5.2. Komponentit

Osaluetteloon merkitään lukumäärän lisäksi kunkin komponentin vaatima piirilevy-pinta-ala, massa ja viimeisin hankintahinta. Näiden summat esitetään datalehdessä ja myös käyttöliittymässä. Hintatietoon lisätään tilauksen päivämäärä.

Lähtökohtaisesti kytkennässä käytetään parhaan laatuluokan komponentteja. Tämä mahdollistaa hintatietojen vertailun funktioiden kesken. Mahdollisista muuta laatu-luokkaa olevista komponenteista tehdään merkintä laajennettuun osaluetteloon ja niiden käyttö perustellaan. Samoin toimitaan, mikäli on käytetty eräkohtaisesti kelpuutettuja komponentteja.

ITAR:n alaiset komponentit aiheuttavat merkittävästi enemmän ongelmia kuin EAR:n alaiset, joten ITAR-komponenteista tehdään merkintä osaluetteloon. Merkinnän puuttumisesta huolimatta käyttäjän on varmistettava asia, sillä ITAR on laajentunut koskemaan yhä useampaa komponenttia. Tämän painottamiseksi lisätään merkintään päivämäärä.

Varoitus, joka koskee vain tiettyä komponenttiterästä, ei aiheuta merkintää osaluetteloon. Tällaisen varoituksen tullessa vain tarkastetaan, onko kyseistä komponenttiterästä käytössä. Mikäli varoitus koskee komponenttimallia tai jopa -tyyppiä, osaluetteloon tehdään merkintä ja asiaa kommentoidaan datalehdessä vähintään viittauksella varoituksen dokumenttitunnukseen.

Komponenttien hankintamenettely vaihtelee projektista toiseen. Avaruusjärjestöjen PPL:illä olevat komponentit eivät ole ratkaisevasti paremmin saatavilla kuin muut vastaavat komponentit. Lisäksi listat päivittyvät, joten tieto komponentin PPL-statuksesta ei ole merkittävä kirjaston kannalta.

### 5.5.3. Analyysit ja simulaatiot

Analyyseissä käytetyt parametrit vaihtelevat missiosta toiseen ja voivat vaihdella myös satelliitin eri osien välillä. Esimerkiksi satelliitin rungossa sijaitsevan, satelliitin perustoiminnoista vastaavan laitteen parametrit voivat erota hyötykuormaan kuuluvan instrumentin parametreista. Aikaisempia analyysejä voidaan kuitenkin käyttää lähtökohtina uuden suunnittelun analyyseissä. Datalehteen merkitään, mitä funktion sisältäviä analyysejä on tehty ja viittaukset näihin. Tarvittaessa analyysien vaikutusta voidaan kuvata kytkennän perusteluissa.

Useat analyysit käsittelevät suurempaa kokonaisuutta kuin yksittäistä funktiota. Turvallisuusanalyysi tehdään laitetasolla. Lämpö- ja mekaniikka-analyysit liittyvät elektroniikkafunktioihin lähinnä lämmönjohtumisen osalta. EMC-analyysi liittyy funktioihin, jotka toimivat rajapintoina, mutta se tehdään yleensä laitetasolla. Vika- ja vaikutusanalyysi tai luotettavuusanalyysi voidaan tehdä komponenttitasolla tai toimilohkotasolla.

Säteilyanalyysi ja PSA tehdään komponenttitasolla, joten niistä saadaan funktiota koskevia huomioita. Säteilyanalyysi on kuitenkin riippuvainen laitteen ja satelliitin mekaniikasta. WCA tehdään komponenttikohtaisesti toimilohkotasolla. Sen perusteella suunnitteluun tehdyt mahdolliset muutokset riippuvat kuitenkin myös naapuritoimilohkojen WCA:ien tuloksista.

Funktiota suunniteltaessa tai analysoitaessa on saatettu käyttää simulaattoriohjelmistoa. Simuloinnissa käytetyt parametrit vaihtelevat, joten varsinkin toisen suunnittelijan tekemää simulaatiota ei välttämättä kannata yrittää hyödyntää vain komponenttiarvoja muuttamalla. Mikäli datalehden täyttäjä on dokumentoinut simulaation riittävän hyvin, datalehdessä voidaan viitata simulaation sisältävään apudokumenttiin. Vastaava vaatimus pätee myös analyysissä käytetyille laskentataulukoille.

#### **5.5.4. Piirilevysuunnittelu, asennus ja testaus**

Osaluetteloon merkitään, mikäli komponentin asennuksessa on erityistä huomioitavaa. Huomiot saattavat vaikuttaa piirilevysuunnitteluun tai asennukseen kuluvaan aikaan, ja niitä kommentoidaan datalehteen. Piirilevysuunnittelussa on esimerkiksi huomioitava komponentti, joka lämmönjohtumisen parantamiseksi liimataan kiinni piirilevyyn.

Liimaukset ja erityisesti johdotukset vievät aikaa. Paljon tehoa kuluttavat komponentit saatetaan kiinnittää mekaniikkaan ja kytkeä piirilevyyn johtimin. Yksikön liittimet saatetaan kiinnittää erilliseen paneeliin, jolloin on käytettävä liittimiä, joissa on kiinteät johtimet. Puristuskontaktillisia liittimiä käytettäessä on erikseen tehtävä testi-liitoksia, joiden laatu tarkastetaan.

Samoin datalehteen on kommentoitava, mikäli kytkennässä on käytetty komponenttia, jolla on vain projektikohtainen hyväksyntä juotosmenetelmälle. Tämä tieto merkitään myös käyttöliittymään. Tästä käyttäjä voi lähteä selvittämään, vastaako asennukselle tehty lämpösyklikoe uuden suunnittelun vaatimuksia.

Datalehteen kommentoidaan myös funktion testaamiseen kuluvaan aikaan ja testitapoihin. Esimerkiksi tehonjakoyksikössä saattaa olla useita samanlaisia virtarajafunktioita. Tällöin aikatauluttamiseen vaikuttaa, voidaanko funktio testata automaattisesti vai vaaditaanko virittämistä ja käsin tehtäviä mittauksia.

#### **5.5.5. Tietojen keruu**

Valmistukseen liittyvät tiedot saadaan valmistusvastaavalta ja testaukseen liittyvät testausvastaavalta. Korttivastaava tuntee kytkennän ja analyysit, vaikka osan analyysistä on voinutkin tehdä toinen suunnittelija. Komponenttien ominaisuuksiin liittyvät tiedot kerätään useista järjestelmistä.

Komponentin piirilevypinta-ala on arvo suunnitteluohjelmiston komponenttikirjastossa. Komponentin massa on erillisessä tietokannassa, josta se haetaan kotelotyypin perusteella. Viimeisimmän ostotilauksen mukainen kappalehinta on ERP-järjestelmässä, josta se haetaan nimikekoodin perusteella.

Edellisessä kappaleessa mainitut tiedot pystytään keräämään automaattisesti. Kytkeäsuunnitteluohjelmistoon toteutetaan komentosarja, joka luo kytkennästä laajennetun osaluettelon ja lisää tiedot siihen. Komentosarjan avulla osaluettelo muotoillaan halutuksi. Mahdollisesti puuttuvat tiedot korttivastaava selvittää yhdessä komponenttikirjaston ylläpitäjän kanssa.

Komponentti-insinööriltä saadaan tiedot vientirajoituksista ja varoituksista. Yrityksessä on keväällä 2010 käynnissä ERP-järjestelmän päivitys. Eräs päivityksen yhteydessä suunniteltu käytäntö on mahdollisen vientilisenssin yhdistäminen jäljitystunukseen. Tällöin tieto vientirajoituksista voitaisiin saada ERP-järjestelmästä, mutta se pitäisi paikkansa vain päivityksen jälkeen varastoon vastaanotetuista komponenteista.

## **5.6. Ylläpito ja konfiguraation hallinta**

Apuohjelma, työkalu tai tietokanta voidaan kehittää vain pientä käyttäjajoukkoa varten. Yksikön tai projektin käyttöön rajautuvaan työkaluun voidaan lisätä räätälöityjä ominaisuuksia, jotka monimutkaistavat toteutusta. Varsinkin jos työkalua kehitetään oman toimen ohella, sen dokumentointi voi jäädä puutteelliseksi. Tällaiset työkalut toimivat ja ovat päivitettävissä vain niin kauan kuin alkuperäinen tekijä ylläpitää sitä.

Tämän kirjaston määrittelyssä on lähdetty toisesta näkökulmasta. Kirjastossa on rajoitettu määrä ominaisuuksia ja sen ylläpito vaatii jonkin verran käsityötä. Kirjasto kuitenkin perustuu olemassa oleviin järjestelmiin ja ohjelmistoihin, joita jokainen yksikön suunnittelija ja järjestelmäinsinööri osaa käyttää.

### **5.6.1. Ohjeistus ja koulutus**

Pilottivaiheen jälkeen kirjasto esitellään yksikön henkilökunnalle. Tässä vaiheessa riittää, että kirjaston olemassaolo tiedetään. Ylläpitäjän on hyvä olla mukana, kun kirjastoa ensimmäisiä kertoja käytetään. Samoin ylläpitäjä neuvoa ensimmäistä kertaa datalehteä täyttävää korttivastaavaa. Rajatun käyttäjämäärän takia ylläpitäjällä oletetaan olevan aikaa henkilökohtaiseen opastukseen ja erillistä koulutusmateriaalia ei tuoteta.

Ylläpito-ohjeessa kuvataan yksityiskohtaisesti kirjaston rakenne PDM-järjestelmässä ja tietueiden kuvauskenttien käyttö. Datalehtien versiointi kuvataan, samoin määritellään perusteet joko uuden datalehden luomiselle tai olemassa olevan revisioidulle. Käyttöliittymän revisioiminen ohjeistetaan.

Datalehden täyttöohjeet sijoitetaan funktiotyypikohtaisiin datalehtipohjiin. Ohjeet poistetaan, kun datalehti lisätään kirjastoon. Tämä vastaa suunnittelun tarkastuspöytäkirjoissa sovellettavaa käytäntöä. Uusia funktiotyyppejä kirjastoon lisättäessä on huomioitava, että kriittiset parametrit määritellään ja perustellaan ohjeeseen selkeästi.

### **5.6.2. Variantti vai uusi funktio**

Pienet muutokset voidaan lisätä olemassa olevan funktion datalehteen variantteina. Pieni muutos on muutos, joka ei merkittävästi vaikuta komponenttien määrään tai

funktion ominaisuuksiin. Lähtökohtaisesti tehdään mieluummin uusi funktio kuin täytetään olemassa olevan datalehti vaihtoehdoilla.

Uuden funktion datalehteen voidaan kopioida materiaalia vanhasta, edellyttäen että se tehdään harkiten. Mikäli esimerkiksi virtarajafunktioon lisätään tilailmaisu, aikaisemmat testaus- ja asennushuomiot pätevät.

### **5.6.3. Tulevaisuus**

Suunnittelu- tai toimisto-ohjelmistojen tulevien versiopäivitysten ei oleteta vaikuttavan kirjaston käyttöön. Ohjelmistot ovat pääsääntöisesti alaspäin yhteensopivia. Komponenttikirjastot eivät välttämättä ole, mutta uusi suunnittelu on joka tapauksessa syytä luoda aina käytössä olevalla kirjastolla. Mikäli funktiossa käytettyä komponenttia ei kirjastossa vielä ole, se luodaan sinne. Ääritapauksessa funktion kytkentä voidaan hakea aputiedostoista, mutta tämä lienee erittäin harvinaista.

Myöskään ERP-järjestelmän päivittäminen ei aiheuttane ongelmia. Mikäli järjestelmästä ulos saatavan tiedon muoto muuttuu tai sitä tulee lisää, päivitetään tietoa hakevaa komentosarjaa. Dokumentit ja nimikkeet ovat olennainen osa PDM-järjestelmää, eikä niiden perusrakenteeseen ole oletettavissa muutosta. Toisen toimittajan järjestelmään vaihto toki vaatisi kirjaston uudelleen rakentamisen, mutta informaatio säilyisi.

Ylläpitäjältä edellytetään järjestelmien ja ohjelmistojen hallintaa, jotta hän pystyy tarvittaessa opastamaan käyttäjiä. Kirjaston yksinkertainen rakenne ei kuitenkaan edellytä erikoisuuksien hallintaa, joten ylläpito-osaaminen ei erityisesti henkilöidy.

## 6. YHTEENVETO JA JATKOKEHITYS

Kirjasto on osa kehitysprojektia. Tämä työ aloitettiin yli vuosi sen jälkeen, kun kirjaston olisi alkuperäisen projektisuunnitelman mukaan pitänyt olla jo käyttökunnossa. Samoin tätä työtä varten päivitetyn aikataulun mukaan kirjaston pitäisi olla jo käyttökunnossa. Työn tekemisen aikana kohdattiin aikatauluongelmia, jotka ovat varmaankin yleisiä vastaaville kehitysprojekteille.

Kehitysprojektia tehdään monesti oman toimen ohella, ilman tiukkaa aikataulua tai alhaisella prioriteetilla. Mikäli projektiryhmä vielä koostuu henkilöistä, joiden varsinaiset työtehtävät liittyvät eri suunnitteluprojekteihin, sattuvat kuormitushuiput ja vapaammat ajanjaksot eri ajankohtiin. Kirjaston muoto ja datalehden sisältö on nyt määritelty, mutta pilottifunktioita tai kirjaston ylläpito-ohjeistusta ei ole vielä luotu. Täten kirjastosta ei ole vielä mitään käyttökokemuksia, jotka varmaankin tulevat muovaamaan sen ominaisuuksia tai sisältöä.

Pilottifunktioiden luomiseen tarvitaan yksikön kokeneita suunnittelijoita. Heitä luonnollisesti tarvitaan myös projekteihin ja hetkittäisesti erittäin kuormittavaan tarjouslaskentaan. Kirjaston määrittelykin on tehty oman toimen ohella, työtehtävien pääpainon ollessa yli kahden vuoden ajan MIXS/SIXS-instrumentin tiedonkäsittelyosan kehityksessä.

Tietojenkäsittelyosan ensimmäiset mallit ovat prototyyppisiä, jotka on tarkoitettu erityisesti ohjelmistokehityksen alustoiksi. Työtehtävät niiden suunnittelussa ja testauksessa sekä konfiguraation hallinnassa ovat tarjonneet pehmeähkön laskun avaruuselektronikan erityispiirteiden pariin. Sisäistettävää on kuitenkin ollut paljon. Osa tästä on esitetty luvuissa kolme ja neljä. Työ jatkuu teknisen mallin ja teknisen kelpuutusmallin parissa, lentomallin ollessa aina lopullisena tavoitteena.

Kytkentäsuunnittelu on ollut vain pieni osa työtehtäviä. Tehtävät ovat vaatineet yhteistyötä projektipäällikön, järjestelmäinsinöörin, testausvastaavan, analyysien laatijan, ohjelmistosuunnittelijan, digitaalisuunnittelijan, piirilevysuunnittelijan, komponentti-insinöörin, laatuvaastaavan, valmistusvastaavan ja suunnitteluohjelmistojen ylläpitäjän kanssa. Kirjaston kannalta merkityksellistä on ollut yrittää ymmärtää, mikä tieto on missäkin kohtaa suunnittelu- ja valmistusprosessia olennaista.

Tässä työssä määritelty kirjasto soveltuu joidenkin kymmenien funktioiden tallentamiseen. Oletusarvoisesti funktioita lisätään kirjastoon harvoin, samoin olemassa olevien funktioiden datalehdet päivittyvät harvoin. Mikäli funktioiden määrä kasvaa oleellisesti, tarvitaan kehittyneempiä hakutoimintoja. Kirjaston sisällön laajenemisen lisäksi on mahdollista, että kirjaston käyttäjäkunta laajenee yksikön ulkopuolisiin henkilöihin.



Yksi määrittelyn aikana esiin nostettu kehityssuunta on PDM-järjestelmän suurempi hyödyntäminen. Funktiot voitaisiin tallentaa järjestelmään puolivalmistenimikkeinä, joilla on rakenne, vastaavasti kuin elektroniikkakortit. Funktioiden kriittiset ominaisuudet tallennettaisiin nimikkeen parametreina. Tällaista toiminnallisuutta tietueiden kuvauskenttiin käytettävät hakutoiminnot eivät tue. Järjestelmään on kuitenkin mahdollista ohjelmoida yksilöllisiä hakutoimintoja ja näitä hyödyntäviä raportteja.

Parametrien tallentaminen PDM-järjestelmään voitaisiin tehdä myös yksittäisille komponenttinimikkeille. Nämä parametrit sisältäisivät tiedon, jota nyt kerätään laajennettuun osaluetteloon. Nimikerakenteisiin ja parametreihin perustuva kirjasto sekä hakutoimintojen ohjelmointi olisivat oma määrittelykokonaisuutensa, esimerkiksi tulevaisuuden kehitysprojekti.

Määrittelyssä muodossaan kirjasto on ainoastaan Space-yksikköä ja avaruuselektronikan funktioita varten. Työssä esitellyistä teknologia- ja ympäristöolosuhdesyistä kirjaston hyödyntäminen liiketoiminnan muissa yksiköissä lienee hyvin vähäistä. Ideoiden ja osaamisen jakamiseksi saatetaan suuremman kytkentäkirjaston määrittely joskus käynnistää.

Yrityksessä on keväällä 2010 käynnissä elektroniikkasuunnitteluprosessin kehitysprojekti. Suunnitteluprosessi ei suoraan liity avaruuselektronikan suunnittelun vaiheisiin (ks. luku 4.1.2), vaan sitä pikemminkin sovelletaan kuhunkin mallifilosofian malliin. Kehitysprojektiin liittyy myös suunnitteluarkiston perustaminen. Nyt määritelty kirjasto saattaa tarjota valmiin rakenteen muiden yksiköiden omille kirjastoille. Näihin kirjastoihin pystytään hyödyntämään edellä kuvattuja kehitysehdotuksia, jolloin myös kirjastojen yhdistäminen saattaa tulla kysymykseen. Tällöin on kiinnitettävä nykyistä määrittelyä enemmän huomiota tietoturvallisuuteen, ettei kirjastossa ole hankekoh- taisten salassapitomääräysten piiriin kuuluvaa informaatiota ulkopuolisten saatavilla.

## LÄHTEET

- [1] Heine, H. Avaruuskelpoisen elektroniikan suunnittelu. Diplomityö. Tampere 1996. Tampereen teknillinen korkeakoulu. 62 s.
- [2] Rantanen, T. Luotettavuusanalyysit avaruuselektroniikan suunnitteluprosessiin. Diplomityö. Tampere 2009. Tampereen teknillinen yliopisto. 91 s.
- [3] Kainu, J. Avaruuslaitteen testaus. Ylempi AMK-opinnäytetyö. 2008. Keski-Pohjanmaan ammattikorkeakoulu, Teknologiaosaamisen johtamisen koulutusohjelma. 71 s.
- [4] ESA - Space Science - BepiColombo overview [WWW]. [viitattu 27.1.2010]. Saatavissa: <http://www.esa.int/science/bepicolombo>
- [5] ESA Science & Technology: BepiColombo Fact Sheet [WWW]. [viitattu 27.1.2010]. Saatavissa: <http://sci.esa.int/science-e/www/object/index.cfm?fobjectid=31278>
- [6] BBC News: Mercury mission clears key hurdle [WWW]. [viitattu 27.1.2010]. Saatavissa: <http://news.bbc.co.uk/2/hi/science/nature/8364704.stm>
- [7] Eurospace Members [WWW]. [viitattu 12.2.2010]. Saatavissa: <http://www.eurospace.org/> → Members
- [8] Component Related ECSS and ESA PSS Standards [WWW]. [viitattu 12.2.2010]. Saatavissa: <https://escies.org/ReadArticle?docId=167>
- [9] Collaboration website of the European Cooperation for Space Standardization [WWW]. [viitattu 12.2.2010]. Saatavissa: <http://ww.ecss.nl/> → Standards → 1. ECSS Architecture
- [10] ESCC 10000 Issue 2. ESCC Organisation, Membership and Decision Process. 2003. European Space Agency. 13 p.
- [11] ESCC REP001 Issue 7. List of Published ESCC Documents and Specifications. 2009. European Space Agency. 99 p.
- [12] ESCC Specification Browser [WWW]. [viitattu 12.2.2010]. Saatavissa: <https://escies.org/esccl/>
- [13] ESCC Basic Specification No. 20500 Issue 1. External Visual Inspection. 2003. European Space Agency. 7 p.

- [14] ESCC Basic Specification No. 2053400 Issue 1. External Visual Inspection of Electrical Connectors. 2003. European Space Agency. 12 p.
- [15] ESCC Generic Specification No. 3401 Issue 1. Connectors, Electrical, Non-Filtered Circular and Rectangular. 2002. European Space Agency. 44 p
- [16] ESCC Detail Specification No. 3401/002 Issue 5. Connectors, Electrical, Rectangular Removable Crimp Contacts, Based on Type D\*MA. 2009. European Space Agency. 27 p
- [17] ECSS-Q-ST-60C Rev.1. Space product assurance - Electrical, electronic and electromechanical (EEE) components. Noordwijk, The Netherlands 2009. ESA Requirements and Standards Division. 93 p.
- [18] Search Mil Specs & Drawings - DSCC [WWW]. [viitattu 12.2.2010]. Saatavissa: <http://www.dscc.dla.mil/Programs/MilSpec/DocSearch.asp>
- [19] MIL-STD-883G. Test Method Standard Microcircuits. USA 2006. Department of Defense. 716 p.
- [20] MIL-PRF-38535H. Integrated Circuits (Microcircuits) Manufacturing, General Specification For. USA 2007. Department of Defense. 191 p.
- [21] MIL-PRF-19500/712B. Semiconductor Device, Field Effect Radiation Hardened (Total Dose and Single Event Effects) Transistors, P-Channel, Silicon, Types 2N7545U3, 2N7546U3, 2N7547T3, and 2N7548T3, JANTXVR, F, G, H and JANSR, F, G, H. USA 2007. Department of Defense. 25 p.
- [22] 5962-98651 Revision H. Microcircuit, Linear, 3 Volt LVDS Quad CMOS Differential Line Driver, Monolithic Silicon. USA 2009. Department of Defense. 20 p.
- [23] MIL-HDBK-103AE. List of Standard Microcircuit Drawings. USA 2009. Department of Defense. 904 p.
- [24] ESCC Generic Specification No. 5000 Issue 6. Discrete Semiconductor Components, Hermetically Sealed. 2010. European Space Agency. 28 p.
- [25] ESCC Generic Specification No. 9000 Issue 6. Discrete Semiconductor Components, Hermetically Sealed. 2010. European Space Agency. 28 p.
- [26] ECSS-Q-ST-60-05C Rev. 1. Space product assurance - Generic procurement requirements for hybrids. Noordwijk, The Netherlands 2009. ESA Requirements and Standards Division. 39 p.

- [27] MIL-PRF-38534G. Hybrid Microcircuits, General Specification For. USA 2009. Department of Defense. 96 p.
- [28] MIL-PRF-19500N. Semiconductor Devices, General Specification For. USA 2005. Department of Defense. 169 p.
- [29] ESCC Qualified Parts List REP005. Updated 15 February 2010. European Space Agency. 158 p.
- [30] ESCC Qualified Manufacturers List REP006 Issue 4. Updated 26-November-2009. European Space Agency. 15 p.
- [31] GSFC-311-QPLD-013. Qualified Parts List Directory. Maryland, USA 2009. NASA/Goddard Space Flight Center. 41 p.
- [32] ECSS P-001B. ECSS - Glossary of terms. Noordwijk, The Netherlands 2004. ESA Requirements and Standards Division. 62 p.
- [33] ECSS-Q-ST-10C. Space product assurance - Product assurance management. Noordwijk, The Netherlands 2008. ESA Requirements and Standards Division. 25 p.
- [34] ECSS-Q-ST-20C. Space product assurance - Quality assurance. Noordwijk, The Netherlands 2008. ESA Requirements and Standards Division. 76 p.
- [35] ECSS-E-ST-10-02C. Space engineering - Verification. Noordwijk, The Netherlands 2009. ESA Requirements and Standards Division. 45 p.
- [36] ECSS-Q-ST-10-09C. Space product assurance - Nonconformance control system. Noordwijk, The Netherlands 2008. ESA Requirements and Standards Division. 39 p.
- [37] TEC-Q/EAS/PROC/2. ESA Alert System – Operational Procedure. Issue 4 revision 2. Noordwijk, The Netherlands 2009. ESA Requirements and Standards Division. 39 p.
- [39] ECSS-M-ST-10-01C. Space management - Organization and conduct of reviews. Noordwijk, The Netherlands 2008. ESA Requirements and Standards Division. 27 p.
- [40] ECSS-M-ST-10C Rev 1. Space project management - Project planning and implementation. Noordwijk, The Netherlands 2009. ESA Requirements and Standards Division. 50 p.

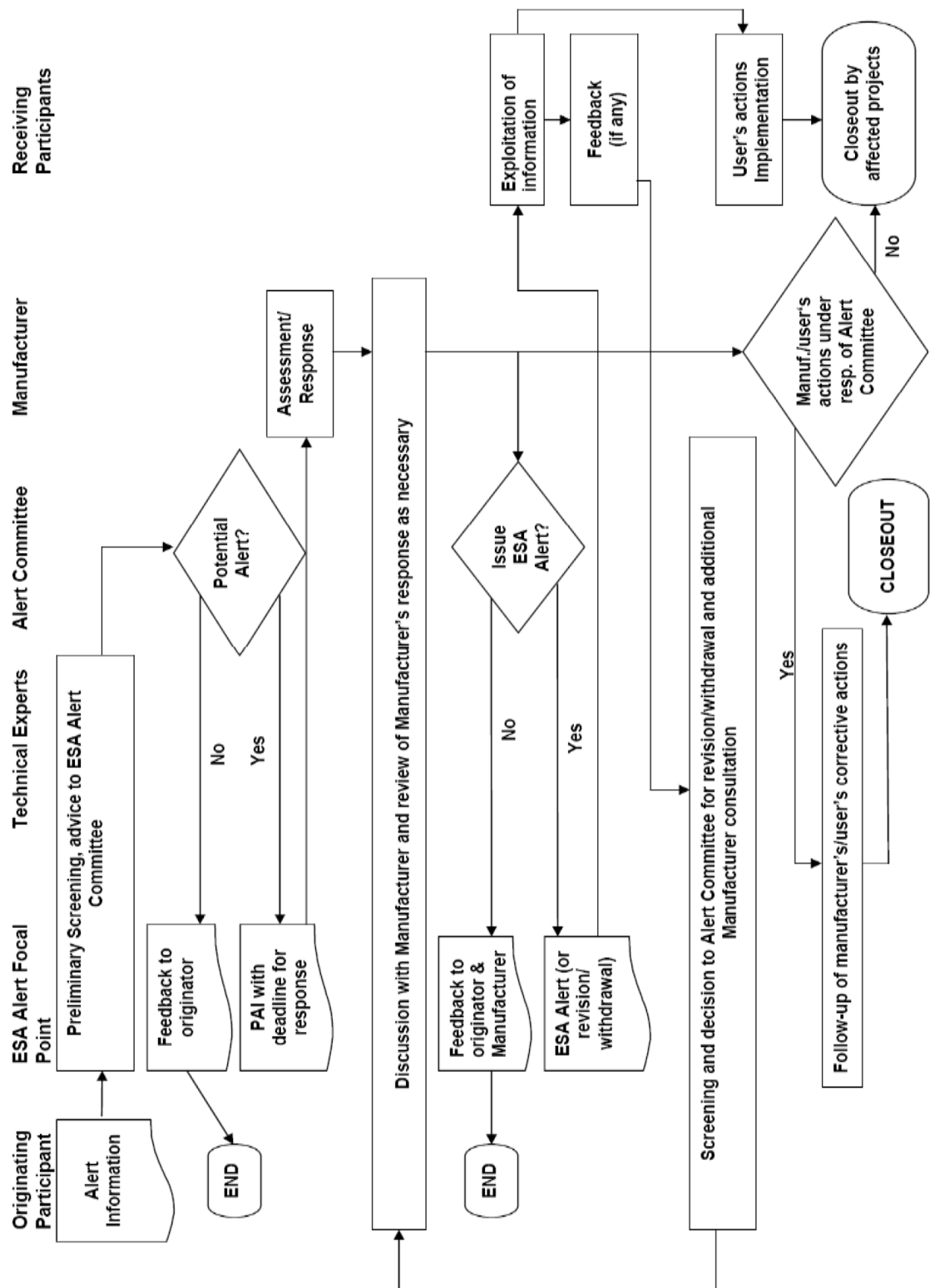
- [42] ECSS-Q-ST-30-11C. Space product assurance - Derating - EEE components. Noordwijk, The Netherlands 2008. ESA Requirements and Standards Division. 59 p.
- [43] ECSS-Q-ST-70-02C. Space product assurance - Thermal vacuum outgassing test for the screening of space materials. Noordwijk, The Netherlands 2008. ESA Requirements and Standards Division. 45 p.
- [44] Edmonds, L.D., Barnes, C.E., Scheick, L.Z. An Introduction to Space Radiation Effects on Microelectronics [julkaisu]. Pasadena, USA. 2000. Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology. 83 p. [viitattu 2.3.2010]. Saatavissa: <http://parts.jpl.nasa.gov/docs/JPL00-62.pdf>
- [45] Renaudie, C., Nickson, B., Mohammadzadeh, A. Summary & Results of Enhanced Low Dose Rate Sensitivity (ELDRS) Testing Performed at the ESTEC Co-60 Facility [esitys]. Noordwijk, The Netherlands. 2005. European Space Research and Technology Centre. 22 p. [viitattu 24.5.2010]. Saatavissa: <https://escies.org/GetFile?rsrid=1316>
- [46] Tiva Bussarakons. The Hermetic Surface Mount Device (SMD), Its Advantages and Solutions to Assembly Integration [sovellusohje]. Internal Rectifier. [viitattu 20.1.2010]. Saatavissa: <http://www.irf.com/technical-info/appnotes/an-1016.pdf>
- [47] Hermetic Packages. [datalehti]. National Semiconductor. 2000. [viitattu 20.1.2010]. Saatavissa: [http://www.national.com/ms/HE/HERMETIC\\_PACKAGES-MISC.pdf](http://www.national.com/ms/HE/HERMETIC_PACKAGES-MISC.pdf)
- [48] Prototyping for the RTSX-S Enhanced Aerospace FPGA [sovellusohje]. Actel Corporation. 2004. [viitattu 16.1.2010]. Saatavissa: [http://www.actel.com/documents/RTSXS\\_Proto\\_AN.pdf](http://www.actel.com/documents/RTSXS_Proto_AN.pdf)
- [49] ESA - Technology - European Component Initiative (ECI) [WWW]. [viitattu 25.2.2010]. Saatavissa: [http://www.esa.int/esaMI/Technology/SEM7NMBDNRF\\_0.html](http://www.esa.int/esaMI/Technology/SEM7NMBDNRF_0.html)
- [50] ECI Phase 1 Deliverables to EPPL / QPL [WWW]. [viitattu 25.2.2010]. Saatavissa: <https://spacecomponents.org/public/eci/ECI1%20status%20report.pdf>
- [51] ECSS-Q-ST-70-10C. Space product assurance - Qualification of printed circuit boards. Noordwijk, The Netherlands 2008. ESA Requirements and Standards Division. 90 p.

- [52] ECSS-Q-ST-70-11C. Space product assurance - Procurement of printed circuit boards. Noordwijk, The Netherlands 2008. ESA Requirements and Standards Division. 46 p.
- [53] ESA Qualification Status of PCBs [WWW]. [viitattu 21.4.2010]. Saatavissa: <https://escies.org/ReadArticle?docId=798>
- [55] ESCC 12300 Issue 1. The European Preferred Parts List (EPPL) and its Management. 2006. European Space Agency. 20 p.
- [56] ECSS-Q-ST-60-14C. Space product assurance - Relifing procedure – EEE components. Noordwijk, The Netherlands 2008. ESA Requirements and Standards Division. 29 p.
- [57] ECSS-E-10-03A. Space engineering - Testing. Noordwijk, The Netherlands 2002. ESA Requirements and Standards Division. 160 p.

#### Julkaisemattomat lähteet

- [38] EADS Astrium. GS2.RS.ASD.RIU.00108 Issue 1. Sentinel-2 Special Conditions of Tender for Remote Interface Unit (RIU). 2009. Julkaisematon dokumentti. 35 p.
- [41] BepiColombo Project Team. BC-EST-RS-01140 Issue 2 Revision 0. Experiment Interface Document - Part A. 2009. Julkaisematon dokumentti. 435 p.
- [54] Immonen, Kimmo. Insinööri, komponentti-insinööri, Patria Aviation Oy. Tampere. Haastattelu 21.4.2010.

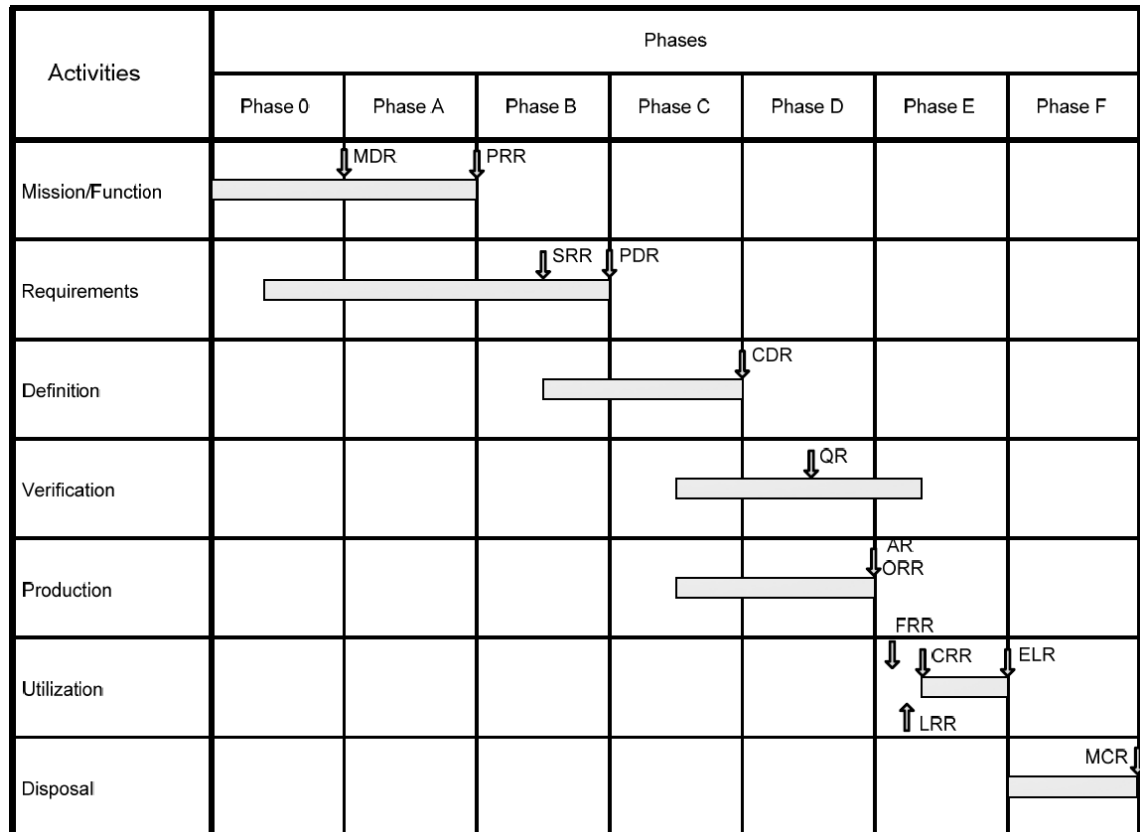
# LIITE 1: ESA:N VAROITUSJÄRJESTELMÄ



PAI Preliminary Alert Information, mahdollisen varoituksen alustavat tiedot

## LIITE 2: MISSION ELINKAARI

Phase 0	Mission analysis/needs identification
Phase A	Feasibility
Phase B	Preliminary Definition
Phase C	Detailed Definition
Phase D	Qualification and Production
Phase E	Utilization
Phase F	Disposal



MDR	Mission Definition Review
PRR	Preliminary Requirements Review
SRR	System Requirements Review
PDR	Preliminary Design Review
CDR	Critical Design Review
QR	Qualification Review
AR	Acceptance Review
ORR	Operational Readiness Review
FRR	Flight Readiness Review
LRR	Launch Readiness Review
CRR	Commissioning Result Review
ELR	End-of-Life Review
MCR	Mission Close-out Review



## LIITE 3: HINTA- JA TOIMITUSAIKAVERTAILU

malli	lisätieto, laatuluokka tai malli	MOQ	vk	hinta/kpl
<b>piirilevy, 12-kerroksinen, n. 210 mm x 210 mm</b>				
prototyyppi		1	2	n. 500 € <sup>1</sup>
EM/QM	MIL-PRF-55110:n mukainen	1	4	n. 1500 € <sup>2</sup>
FM	ECSS-Q-70-11-A:n mukainen	1	5	n. 2000 € <sup>2</sup>

<b>diodi, piensignaali, 1N6642</b>				
prototyyppi	JANTX	50	12	5 €
EM/QM	JANTXV	50	12	30 €
FM	JANS	50	36	46 €

<b>D-liitin, puristuskontaktit, 15-napainen</b>				
prototyyppi	kaupallinen vastaava	1	1	5 €
EM/QM	DEMA-15P-NMB-FR022 <sup>3</sup>	5	12	27 €
FM	ESCC 3401/002 mukainen	5	18	40 €

<b>vastus, pintaliitos</b>				
prototyyppi	kaupallinen 1206-koteloinen	100	1	0,02 €
EM/QM	RM1206-sarja	300	12	1 €
FM	RM1206-sarja	300	12	1 €

<b>teho-MOSFET, 2N7545U3</b>				
prototyyppi	kaupallinen vastaava <sup>4</sup>	1	1	10 €
EM/QM	IRHNP597130 <sup>3,5</sup> (TID 100 kRad)	10	24	340 €
FM	JANS, RHA R <sup>5</sup>	10	36	650 €

<b>FPGA, kerta-ohjelmoitava, 2 000 000 logiikkaporttia</b>				
prototyyppi	RTAX2000SL-1CQ352PROTO <sup>6</sup>	10	12	360 €
EM/QM	RTAX2000SL-1CQ352B <sup>6</sup>	1	16	4 300 USD
FM	RTAX2000SL-1CQ352E <sup>6</sup>	1	30	28 000 USD

<b>LVDS-ajuri, nelikkö</b>				
prototyyppi	SN65LVDS31D <sup>4</sup>	1	1	3,85 €
EM/QM	UT54LVDS031LV-UCC <sup>3,5,7</sup>	12	12	670 USD
FM	5962R9865103VYC (RHA R) <sup>5</sup>	12	24	820 USD

vk toimitusaika viikkoina

MOQ vähimmäistilausmäärä (engl. Minimum Order Quantity)

<sup>1</sup> Piirilevytilaukseen tulee lisäksi kertaluonteisia kustannuksia n. 500 €

<sup>2</sup> Piirilevytilaukseen tulee lisäksi kertaluonteisia kustannuksia n. 1100 €

<sup>3</sup> Valmistajan mallinumero, mitään laatuluokkaa ei taata.

<sup>4</sup> Erilainen piirilevyjäljälki kuin FM-komponentilla

<sup>5</sup> EAR:n alainen komponentti

<sup>6</sup> ITAR:n alainen komponentti

<sup>7</sup> Säteilyn sietoa ei taata.

## LIITE 4: DATALEHDEN SISÄLTÖ

- 1 Perustiedot
  - 1.1 Tyyppi  
funktio-tyyppi ja lisäominaisuudet
  - 1.2 Valmistetut mallit  
viittaukset kytkentäkaavioihin ja suunnitteludokumentteihin
- 2 Kuvaus
  - 2.1 Kriittiset suunnitteluparametrit
  - 2.2 Muut sähköiset ominaisuudet
- 3 Komponentit
  - 3.1 Yhteenveto osaluettelosta  
hinta, pinta-ala, massa  
huomiot yllä olevista tai esimerkiksi muusta kuin parhaasta laatuluokasta
  - 3.2 Rajoitukset  
mahdolliset vientirajoitukset, varoitukset, valmistus lopetettu
  - 3.3 Kelpuutukset  
projektikohtainen asennushyväksyntä, ei-lentokelpoiset komponentit
- 4 Kytkenäkaavio
- 5 Analyysit
  - 5.1 PSA  
viittaus analyysiin ja mahdolliseen erilliseen laskentataulukkoon  
lähtöparametrit
  - 5.2 WCA (kuten 5.1)
  - 5.3 Muut analyysit  
viittaukset analyysihin, joissa funktio on mukana  
FMECA:sta huomioita, jos analyysi on tehty komponenttitasolla
- 6 Säteilyn sieto
  - 6.1 TID ja ELDRS  
kriittiset komponentit, eniten alttiit komponentit
  - 6.2 SEE (kuten 6.1)
- 7 Valmistus ja testaus
  - 7.1 Komponenttien lukumäärä  
koneladottavat, käsinasennettavat, hankalasti asennettavat ja näistä huomiot
  - 7.2 Työmääräarvio  
viritys, muu testaus
  - 7.3 Testilaitteisto
- 8 Vapaa sana  
kokemukset, projektit joissa käytetty, variantit
- Liite Laajennettu osaluettelo  
nimikekoodi ja kuvaus, lukumäärä, pinta-ala, massa, hinta ja päiväys,  
merkinnät (ITAR, varoitus, hankala asennus, muu kuin paras laatuluokka)

LIITE 5: DATALEHDEN LUONTIPROSESSI

